



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของธาตุเจือและการแปรรูปเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสติเนติก
และกลุ่มเฟอร์ริติกในสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน

โดย นายคชาวุธ กุ่มภัย

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

23 มีนาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ศิริพร คาวพิเศษ)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทร์อัมพร)

กรรมการ

(ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์)

การศึกษาผลกระทบของธาตุเจือและการแปรรูปเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิค
และกลุ่มเฟอร์ริติกในสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยเชื่อม

นายคชาวุธ คุ่มภัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายคชาวุธ คุ่มภัย
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาผลกระทบของธาตุเจือและการแปรรูปเย็นของเหล็กกล้าไร้
สนิมกลุ่มออสติเนติก และกลุ่มเฟอร์ริติกในสภาวะการกัดกร่อนภายใต้
รอยซ้อน
สาขาวิชา : วิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล
: รองศาสตราจารย์ศิริพร ดาวพิเศษ
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อการศึกษาถึงผลกระทบของธาตุเจือและการแปรรูปเย็นในสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน ในการศึกษาผลของธาตุเจือต่อการกัดกร่อนจะใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสติเนติกและเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก สำหรับในการศึกษาผลกระทบของการแปรรูปเย็นจะทำการทดสอบในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสติเนติกที่มีปริมาณนิเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อย (Low Ni) โดยเหล็กกล้าไร้สนิมดังกล่าวผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ทั้งสองผลกระทบที่ทำการศึกษานี้จะทำการทดสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (open circuit potential) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 โมลาร์ ค่าพีเอช 6.6 ภายใต้อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองด้านผลกระทบของธาตุเจือต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนในเหล็กกล้าไร้สนิม แสดงให้เห็นว่าทำการเพิ่มปริมาณนิเกิลและโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น

ผลกระทบการแปรรูปเย็นต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนในเหล็กกล้าไร้สนิม ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการกัดกร่อนไม่ได้เพิ่มขึ้นโดยตรงกับการเกิดมาร์เทนไซด์ โดยการกัดกร่อนน่าจะเป็นผลกระทบโดยตรงกับจากการดิสโลเคชัน (dislocation) ซึ่งจะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ดิสโลเคชันกระทำเหมือนเป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน

(วิทยานิพนธ์นี้มีจำนวนทั้งสิ้น 71 หน้า)

คำสำคัญ : เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสติเนติก และกลุ่มเฟอร์ริติก, การกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน,
ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Khatawut Khumpai
Thesis Title : Effects of Alloying Elements and Cold Working of Austenitic and Ferritic
Stainless Steels on Crevice Corrosion Behaviors
Major Field : Chemical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Assistant Professor Dr.Samorn Hirunpraditkoon
: Associate Professor Siriporn Daopiset
Academic Year : 2006

Abstract

The aim of this research is to study the effects of alloying elements and cold working on crevice corrosion of Stainless Steels (SS). Austenitic and ferritic SS were used to study on the effect of alloying elements (Ni and Mo). For effect of cold working, the experiments were tested with 0, 10, 20, 30 and 70 % deformation of Low Ni austenitic SS. Both studies were tested in 2 M NaCl , 50°C and 24 hours by using open circuit potential measurement technique.

The results of the effect alloying elements of SS showed that the crevice current increased with reducing Ni and Mo contents, which corresponded to an ennoblement of the corrosion potential.

The experiments of the effect of cold working presented that the crevice current increased by 0% to 30% deformation of SS, and it decreased with the percentage of deformation increased from 30% to 70% deformation of SS. The results showed that the current density was not significantly increased with α' martensite in SS. The effect of dislocation was seemed to be the stimulator of crevice corrosion.

(Total 71 pages)

Keywords : Austenitic and ferritic stainless steels, Cold working, Crevice corrosion,
Open circuit measurement

Advisor

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้น	4
2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	4
2.2 ผลกระทบโดยทั่วไปของการกักกร่อนภายใต้รอยซ้อน	6
2.3 ผลกระทบของธาตุเจือต่อการกักกร่อน	7
2.4 ผลกระทบของการแปรรูปเย็นต่อการกักกร่อน	11
2.5 บทสรุป	20
บทที่ 3 ขั้นตอน และวิธีดำเนินการทดลอง	21
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	21
3.2 การเตรียมวัสดุ	23
3.3 การเตรียมอุปกรณ์	24
3.4 ลักษณะของรูปแบบสัญญาณ	28
บทที่ 4 ผลการทดลองด้านผลกระทบของธาตุเจือ	31
4.1 บทนำ	31
4.2 ผลการทดลองที่ได้ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 200 โดยวิธีการวัดแบบ ศักย์ไฟฟ้ากักกร่อน	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสติเนติกกับและกลุ่มเฟอร์ริกโดยวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากัฏกร่อน	34
4.4 ลักษณะรูปร่างของพื้นที่การกัฏกร่อน	35
4.5 การคำนวณอัตราการกัฏกร่อนต่อพื้นที่ (current density)	40
4.6 ผลการทดลองด้านผลกระทบของธาตุเจือต่อการกัฏกร่อนภายใต้รอยซ้อน	41
บทที่ 5 ผลการทดลองด้านผลกระทบของการแปรรูปเย็น	45
5.1 บทนำ	45
5.2 ผลกระทบของการรีดเย็นต่อค่ากระแสการกัฏกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัฏกร่อน	45
5.3 ลักษณะรูปร่างของพื้นที่การกัฏกร่อน	47
5.4 การคำนวณอัตราการกัฏกร่อนต่อพื้นที่ (current density)	50
5.5 ผลการทดลองด้านผลกระทบของการแปรรูปเย็นต่อการกัฏกร่อนภายใต้รอยซ้อน	50
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	55
6.1 ผลกระทบของธาตุเจือต่อการกัฏกร่อนภายใต้รอยซ้อน	55
6.2 ผลกระทบของการแปรรูปเย็นต่อการกัฏกร่อนภายใต้รอยซ้อน	55
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก ก	
ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัฏกร่อน, และความลึกของการกัฏกร่อน ผลกระทบปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิม	61
ภาคผนวก ข	
ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัฏกร่อนที่เกิดจากผลกระทบของปริมาณ โมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิม	63
ภาคผนวก ค	
ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัฏกร่อน, และความลึกของการกัฏกร่อน ที่เกิดจากผลกระทบการรีดเย็นในเหล็กกล้าไร้สนิม Low Ni	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม Low Ni เนื่องจากการรีดเย็นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของมาร์เทนไซด์ จากศูนย์วิจัยของ Uginé [13]	67
---	----

ภาคผนวก จ

การคำนวณประจุ (charge) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Origin 6.1	69
ประวัติผู้วิจัย	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ขอบเขตของการศึกษาการกัดกร่อนในสภาวะที่จำลองขึ้นแบบภายใต้รอยเชื่อม	21
3-1 ส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิด	23
3-2 ส่วนผสมของธาตุต่างๆในเหล็กกล้าไร้สนิมในการทดลอง	24
4-1 พื้นที่การกัดกร่อนที่ได้จากการคำนวณที่ได้จากซอฟต์แวร์	37
4-2 ผลที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาความลึกของการกัดกร่อน	39
4-3 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม	40
5-1 ค่ากระแสการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน	45
5-2 ผลที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาความลึกของการกัดกร่อน	49
ก-1 ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อน, และความลึกของการกัดกร่อน ผลกระทบปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิม	62
ข-1 ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อนที่เกิดจากผลกระทบของปริมาณ โมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิม	64
ค-1 ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อน, และความลึกของการกัดกร่อน ที่เกิดจากผลกระทบการรีดเย็นในเหล็กกล้าไร้สนิม Low Ni	66

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	การกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวของเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายที่มีคลอไรด์	5
2-2	ค่ากระแสการกัดกร่อนที่จุลวิฤตจะมีค่าสูงขึ้นกับสภาวะความเป็นกรด	6
2-3	ผลกระทบของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมกับดีพาสซิเวชันพีโอซ	7
2-4	ลักษณะของกลไกการกัดกร่อนบริเวณรอยร้าวกับสภาวะความเป็นกรด	7
2-5	แสดงนำแมงกานีสมาแทนที่นิเกิลโดยส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม	9
2-6	การเปลี่ยนแปลงของ α และ ε กับการเพิ่มความเครียดของเหล็กกล้าไร้สนิม	11
2-7	ความสัมพันธ์ของมาร์เทนไซด์และอัตราการรีดของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบ Low Ni จาก ศูนย์วิจัยของบริษัท Ugine	12
2-8	ผลกระทบของการรีดเย็นต่อพฤติกรรมของโลหะ a) แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งและอัตราการรีดเย็น b) แสดงความสัมพันธ์ของมาร์เทนไซด์ซึ่งได้เพิ่มขึ้นกับอัตราการรีด	13
2-9	แสดงขนาดของสลิปที่เกิดขึ้นบนเกรนอันเนื่องมาจากความเค้นเนื่องสลิปแบบแถบ จะประกอบไปด้วยหลายๆ สลิปซึ่งเส้นเข้าด้วยกัน	14
2-10	ลักษณะทั่วไปของความชันของ face-center cubic ของผลึกเดี่ยว	15
2-11	พฤติกรรมของดิสโลเคชันในแมกนีเซียมอัลลอย AM50 alloy โดยการเพิ่มความเค้นและความเครียดให้กับโลหะ a) ลักษณะของดิสโลเคชันในช่วงไดนามิกรีโคเวอร์รีการแปรรูปเย็นที่ 6.8% b) การกองทับกันของดิสโลเคชัน	16
2-12	รูปแบบพฤติกรรมของดิสโลเคชันจะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีสิ่งกีดขวางและจะทำให้เกิดการกองของดิสโลเคชัน	17
2-13	ความสัมพันธ์ของการเลือกเกิดการกัดกร่อนบริเวณสลิป a) แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าและสลิปที่เกิดขึ้นบนเกรนของโลหะ ϕ คือศักย์ไฟฟ้าเฉพาะที่เกิดบนสลิป b) ลักษณะของพื้นผิวที่เกิดขึ้นของแมกนีเซียมอัลลอย armco-iron-surface และการวัดศักย์ไฟฟ้า	18
2-14	ส่วนผสมของออกไซด์ของ ทองแดง แมงกานีส โครเมียม และเหล็กในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการรีดเย็นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์	20

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-15	ส่วนผสมที่เกิดขึ้นในฟิล์มออกไซด์และไฮดรอกไซด์ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่าน การรีดเย็นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์	20
3-1	การขัดผิวด้วยกระดาษทราย	25
3-2	ชิ้นงานแช่ในสารละลายของโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสภาวะพีเอช 6.6 ณ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง	25
3-3	ลักษณะของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	26
3-4	ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดทำงานเพื่อทำให้เกิดสภาวะการกัดกร่อนภายใต้ รอยซ้อน	26
3-5	ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดทำงานที่จะนำไปแช่ในสารละลายของ โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง	27
3-6	การเกิดการกัดกร่อนบริเวณภายใต้รอยซ้อนของขั้วอิเล็กโทรดทำงานของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 409 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง	27
3-7	รูปแบบของอุปกรณ์การวัดแบบโอเพ่นเซอร์กิตโพเทนเชียลและการเก็บข้อมูล ในการทดลอง	28
3-8	การทำสมดุลของประจุ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทำงาน และอิเล็กโทรดวัดกระแส	29
3-9	แสดงลักษณะของสัญญาณของกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่ได้ หลังจากทำการ ทดลองเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ของเหล็กกล้าไร้สนิม B2	30
4-1	ลักษณะของกระแสและศักย์ไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีส่วนผสมของ จำนวนนิกเกิล 4.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	31
4-2	ผลกระทบของปริมาณนิกเกิลต่อค่ากระแสการกัดกร่อน	33
4-3	ผลกระทบของปริมาณนิกเกิลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน	33
4-4	การเปรียบเทียบกระแสการกัดกร่อนที่คงที่ของเหล็กกล้าไร้สนิม	34
4-5	การเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่คงที่ของเหล็กกล้าไร้สนิม	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-6 แสดงพื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์	36
4-7 ความสัมพันธ์ของปริมาณของนิกเกิลกับพื้นที่การกัดกร่อนหลังจากถูกนำไปทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในสถานะที่เป็นกลางโดยทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 50°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง	37
4-8 โมเดลของการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนในลักษณะสามมิติ	38
4-9 ความลึกโดยเฉลี่ย (depth of area) ของการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 200	39
4-10 ผลกระทบของนิกเกิลและโมลิบดีนัมต่ออัตราการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ของเหล็กกล้าไร้สนิม	41
4-11 ความสัมพันธ์ของปริมาณของนิกเกิลกับศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิม	42
4-12 กลไกของฟิล์มพาสซีฟเกิดความเสียหายเนื่องจากอิทธิพลของซัลเฟตที่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวของโลหะ	42
4-13 ความสัมพันธ์ของปริมาณของโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อศักย์ไฟฟ้า	43
4-14 ความสัมพันธ์ของปริมาณของโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่ออัตราการกัดกร่อน	44
5-1 ผลกระทบของการแปรรูปเย็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้ผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30, และ 70 เปอร์เซ็นต์ของการรีด ต่อการกัดกร่อน	46
5-2 ผลกระทบของการแปรรูปเย็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้ผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30, และ 70 เปอร์เซ็นต์ของการรีด ต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน	46
5-3 แสดงพื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์	47
5-4 ความสัมพันธ์พื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนกับการแปรรูปเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิม	48
5-5 ความลึกโดยเฉลี่ยของพื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน ของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์	49
5-6 ความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-7 ความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์	51
5-8 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนมาร์เทนไซต์ซึ่งได้เพิ่มขึ้นกับอัตราการรีด	52
5-9 ความสัมพันธ์ของความเค้นดึงของแมกนีเซียมอัลลอยที่มีผลต่อกระแสดการกัดกร่อน	53
5-10 ความสัมพันธ์ของความเค้นดึงและอัตราการกัดกร่อนต่อปีของเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นระยะเวลา 26 ชั่วโมง และ 556 ชั่วโมง ในสารละลาย 30% HCl	53
ง-1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม Low Ni เนื่องจากการรีดเย็นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของมาร์เทนไซต์ จากบริษัท ศูนย์วิจัยของ Ugine [13]	68
จ-1 การคำนวณประจุ (charge) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Origin 6.1	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของการวิจัย

เหล็กกล้าไร้สนิมได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายอันเนื่องมาจากคุณสมบัติในด้านการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีในสถานะที่เสถียรต่อการกัดกร่อน โดยทั่วไปแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีส่วนผสมของโครเมียมเป็นส่วนผสมในโลหะเป็นอย่างน้อย 11 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวนี้จะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถสร้างฟิล์มออกไซด์บริเวณพื้นผิวเพื่อช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนหรือยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทได้ตามลักษณะของโครงสร้าง เช่น โครงสร้างออสติเนติก (austenitic structure) โครงสร้างเฟอร์ริติก (ferritic-structure) โครงสร้างมาร์เทนซิติก (martensitic structure) และ โครงสร้างดูเพล็กซ์ (duplex structure) ในการทำวิจัยนี้จะใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสติเนติก และ เฟอร์ริติก ในการศึกษาผลกระทบของธาตุเจือและผลกระทบอันเนื่องมาจากการแปรรูปเย็นต่อการกัดกร่อน

การกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว (crevice corrosion) เป็นการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับสารเคมี โดยการเริ่มต้นของการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวจะเริ่มจากความแตกต่างของปริมาณออกซิเจนบริเวณภายในและภายนอกของรอยร้าว (crevice) [1, 2] การกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวสามารถแบ่งสถานะการเกิดการกัดกร่อนได้เป็น 2 สถานะ คือ สถานะเริ่มต้นของการเกิดการกัดกร่อน (initiation stage) โดยจะมีระยะเริ่มต้นตั้งแต่การเริ่มที่ไม่มีเกิดการกัดกร่อนไปจนถึงฟิล์มออกไซด์ที่ผิวเริ่มถูกทำลาย เรียกว่า ช่วงระยะเวลาการฟักตัวบริเวณพื้นผิวฟิล์ม (incubation-period) โดยบริเวณดังกล่าวจะยังไม่เกิดการกัดกร่อนที่พื้นผิวโลหะ สำหรับสถานะหลังจากฟิล์มออกไซด์ที่ผิวเริ่มต้นถูกทำลายและจะเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง (propagation stage) โดยทั่วไปแล้วการกัดกร่อนในช่วงเริ่มต้นนั้นจะมีความเกี่ยวเนื่องโดยตรงกับความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มออกไซด์ ซึ่งลักษณะทางกายภาพของฟิล์มออกไซด์ของโลหะจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของธาตุเจือในเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น โครเมียม โมลิบดีนัม นิกเกิล และ ซัลเฟอร์ เป็นต้น สำหรับการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวจะมีความเกี่ยวข้องกับสารละลายสถานะความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งจะมีค่าวิกฤตของความเป็นกรดหรือค่าพีเอช (depassivation-pH, pH_d) เป็นค่าบ่งบอกถึงความเสถียรภาพของฟิล์มของโลหะ

ค่าดีพาสซิเวชันพีเอชที่ต่ำจะสามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของฟิล์มออกไซด์หรือความต้านทานของการกัดกร่อนที่ดีกว่าค่าดีพาสซิเวชันพีเอชที่สูง นอกเหนือจากนั้นยังได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวในช่วงสภาวะหลังจากฟิล์มออกไซด์ที่ผิวเริ่มถูกทำลายจนถึงช่วงการกัดกร่อนอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง กล่าวคือความรุนแรงของการกัดกร่อนในช่วงดังกล่าวขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวบริเวณที่ถูกกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว (anodic area) กับพื้นที่ที่ไม่เกิดการกัดกร่อน (cathodic area) หากค่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยการกัดกร่อนก็จะยังมีความรุนแรง นอกเหนือจากนั้นอัตราส่วนของพื้นที่ดังกล่าวยังได้ส่งผลกระทบต่อค่าดีพาสซิเวชันพีเอชและนำไปสู่อัตราการกัดกร่อนที่รุนแรงอีกด้วย [2]

ในการทำวิจัยนี้ ทำการศึกษาผลกระทบธาตุเจือและการแปรรูปเย็นในสภาวะการจำลองการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว โดยชิ้นงานจะถูกนำมาทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นสูงและมีค่าพีเอชที่ 6.6 ภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่จะนำมาศึกษาผลกระทบของธาตุเจือที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน คือ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิค (AISI 200 และ AISI 304) และเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริค (AISI 430 และ AISI 444) โดยทำการศึกษาผลกระทบของการแปรรูปเย็นต่อการกัดกร่อนใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิคที่มีนิเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อย (Low Ni) และเหล็กกล้าไร้สนิมดังกล่าวจะผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์

1.2 วัตถุประสงค์

ในการทำวิจัยนี้จะมีการจำลองกระบวนการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว โดยการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าแบบศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนซึ่งจะสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวที่เกิดจากธาตุเจือและการแปรรูปเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งในการศึกษาธาตุเจือที่มีผลต่อพฤติกรรมของการกัดกร่อนนี้ จะให้ความสำคัญกับปริมาณของนิเกิลและ โมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นหลัก สำหรับการศึกษาการแปรรูปเย็น โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการรีดเย็น 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลต่อการกัดกร่อน นอกเหนือจากการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าแล้วก็จะมีการใช้ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมาอธิบายอย่างมีเหตุและผลเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการกัดกร่อนมากยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ทำการทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมโดยนำชิ้นงานมาทดสอบภายใต้สภาวะการทดลองที่ได้จำลองโดยวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากัศกร่อน

1.3.2 เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองทางเคมีไฟฟ้า โดยการเปรียบเทียบค่าของกระแสการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากการประมวลผลและการเก็บข้อมูลจากซอฟต์แวร์

1.3.3 ทำการตรวจวัดเพื่อหาพื้นที่ผิวของการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบอันเนื่องมาจากธาตุเจือและการแปรรูปเย็นในสภาวะการจำลองการกัดกร่อนภายใต้รอยข้อ

1.4.2 ฝึกให้สามารถนำทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้อย่างมีเหตุและผล

1.4.3 ความรู้ที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในสภาวะที่มีการกัดกร่อนได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้น

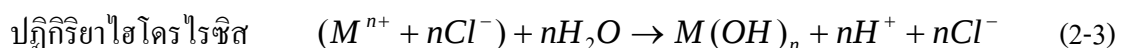
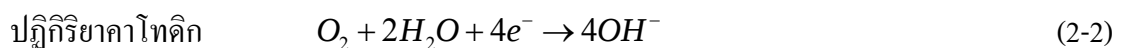
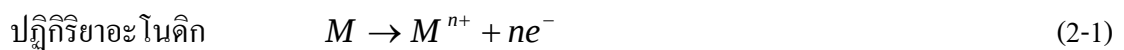
2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

การกัดกร่อน (corrosion) หมายถึงการเสื่อมสภาพของโลหะจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของโลหะกับสิ่งแวดล้อมของโลหะ สิ่งที่จะผลกระทบโดยตรงกับอัตราเร็วในการเกิดกัดกร่อนของเนื้อวัสดุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ของสารละลาย สำหรับปัจจัยอื่นๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับการกัดกร่อน อาทิเช่น ความเค้นทางกลศาสตร์ (mechanical stress) และการกัดเซาะ (erosion) ยังมีผลต่อการกัดกร่อนของวัสดุด้วยเช่นกัน

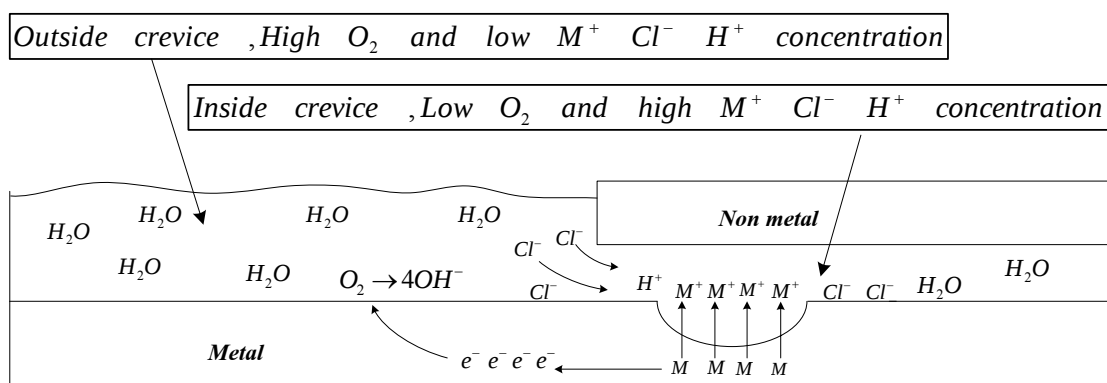
การกัดกร่อนสามารถจำแนกตามลักษณะได้ 2 ประเภท คือ การกัดกร่อนแบบทั่วพื้นผิว (uniform corrosion) และการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (localized corrosion) โดยทั่วไปแล้วในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีจะให้ความสำคัญกับการป้องกันการเกิดกัดกร่อนแบบเฉพาะที่เป็นพิเศษ อันเนื่องมาจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจะส่งผลเสียหายที่รุนแรงกว่าการกัดกร่อนแบบทั่วพื้นผิว สำหรับการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่นั้นยังสามารถจำแนกได้หลายประเภท เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) การกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน (crevice corrosion) การกัดกร่อนตามขอบเกรน (intergranular corrosion) การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (stress corrosion) และ การกัดกร่อนเนื่องจากการเซาะ (erosion corrosion) เป็นต้น

สำหรับในการวิจัยนี้จะให้ความสำคัญเฉพาะการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าภายในบริเวณภายใต้รอยซ้อนหรือรอยแยกซึ่งจะมีสารละลายที่อยู่นิ่ง บริเวณการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดขึ้นฟิล์มออกไซด์ที่ผิวซึ่งมีความหนาโดยประมาณ 1-10 นาโนเมตร สาเหตุในตอนเริ่มต้นของการเกิดการกัดกร่อนหรือบริเวณฟิล์มออกไซด์ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ลักษณะของพื้นผิวหรือความขรุขระภายใต้รอยซ้อน และระยะห่างของรอยซ้อน ถ้าหากมีช่วงที่ห่างมากโอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนก็จะเกิดน้อยกว่าช่วงที่แคบกว่า เนื่องจากออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปบริเวณภายในได้ แต่ก็เกิดการกัดกร่อนในรูปแบบอื่นๆ แทน เช่น การกัดกร่อนแบบทั่วพื้นที่ผิว หรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม สิ่งที่ได้กล่าวมานั้นจะเป็นผลที่เกิดมาจากสภาพแวดล้อมที่นำไปสู่การกัดกร่อน นอกเหนือจากสิ่งแวดล้อมแล้วส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมก็ยังมีส่วนสำคัญที่ช่วยทำให้เกิดการกัดที่แตกต่างกัน

ในการวิจัยนี้ได้อ้างอิงถึงลักษณะของการเกิดการกัดกร่อนภายใต้รอยร่อน ของ Old field & Sutton [1] ไว้ดังนี้ โดยการเกิดการกัดกร่อนภายใต้รอยร่อนนั้นเริ่มต้นจากการเกิดกระแสบริเวณที่ผิวของโลหะกับสารละลายบริเวณรอยร่อน ซึ่งทำให้เกิดการใช้ออกซิเจน ของปฏิกิริยาอะโนดิก (anodic reaction) และปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction) ดังในสมการที่ 2-1 และ สมการที่ 2-2 เมื่อระยะเวลาผ่านไป การแพร่ของออกซิเจนจากภายนอกสู่ภายในช่องว่างก็จะแพร่ได้น้อยลง อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาแคโทดิกจะมีการการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับปฏิกิริยาอะโนดิกอย่างรวดเร็ว จนนำไปสู่การการลดลงของปริมาณออกซิเจน (deoxygenation) บริเวณภายใต้รอยร่อนในขั้นตอนดังกล่าวนี้ยังไม่เกิดการกัดกร่อน เมื่อระยะเวลาผ่านไปบริเวณภายในรอยร่อนเกิดกลไกการแตกตัวของน้ำหรือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) เป็นสาเหตุให้เกิดโปรตอนที่สูงขึ้นรวมทั้งเกลือ ทำให้บริเวณดังกล่าว เกิดสภาวะที่เป็นกรดบริเวณภายในรอยร่อน ดังในสมการที่ 2-3



หลังจากเกิดความเป็นกรดและเกลือที่สูงขึ้นบริเวณภายในรอยร่อนที่มากพอแล้ว จะทำให้ฟิล์มออกไซด์เกิดความเสียหายขึ้น เรียกว่า การเกิดการกัดกร่อนในช่วงเริ่มต้น (initiation stage) สภาวะดังกล่าวฟิล์มยังไม่เสียหายมากและอาจซ่อมแซมได้ หลังจากนั้นเมื่อมีการกัดกร่อนที่สูงขึ้นและอย่างต่อเนื่องและอย่างรวดเร็ว (propagation stage) ฟิล์มของโลหะไม่สามารถซ่อมแซมได้ รวมทั้งเนื้อของโลหะจะถูกทำลาย ดังแสดงในภาพที่ 2-1

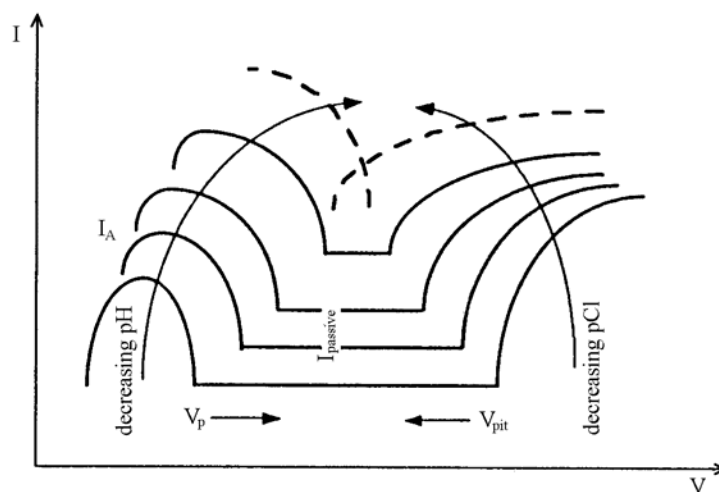


ภาพที่ 2-1 การกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวของเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายที่มีคลอไรด์ [3]

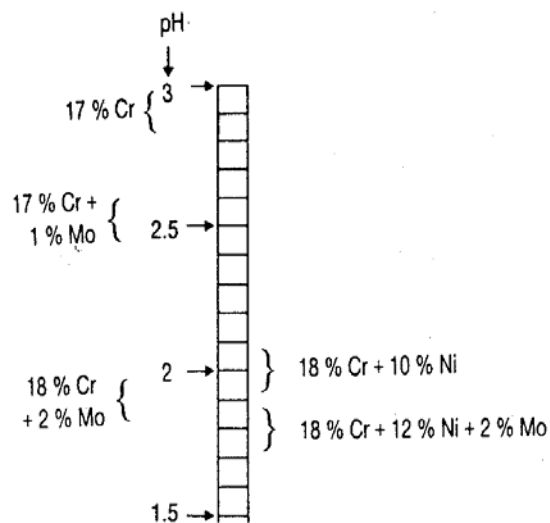
2.2 ผลกระทบโดยทั่วไปของการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว

2.2.1 ผลกระทบของสถานะความเป็นกรดกับการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว

จากการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าได้แสดงให้เห็นว่าสถานะที่มีความเป็นกรดที่ต่ำจะส่งผลให้กระแสการกัดกร่อน (I_A) รุนแรงมากยิ่งขึ้น นอกเหนือจากนั้นการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ยังทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (V_{pit}) มีค่าต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 2-2 แสดงให้เห็นค่ากระแสการกัดกร่อนที่จุดวิกฤตที่มีค่าสูงขึ้นกับสถานะความเป็นกรดที่ลดลง ในทางปฏิบัติแล้วจะนำค่ากระแสการกัดกร่อนที่จุดวิกฤตและพีเอสมาทำการพล็อตกราฟ จะได้ค่าที่บ่งบอกถึงความเสถียรของฟิล์มออกไซด์ของโลหะซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบทางเคมีไฟฟ้า คือ ค่าดีพาสซิเวชันพีเอช (depassivation pH, pH_d) ค่าดีพาสซิเวชันพีเอชที่ต่ำจะบอกถึงความแข็งแรงหรือความต้านทานของการกัดกร่อนที่ดีกว่าค่าดีพาสซิเวชันพีเอชที่สูง ค่าของดีพาสซิเวชันพีเอชยังขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะ เช่นโครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม เป็นต้น นั้นมีผลกระทบค่าดีพาสซิเวชันที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-3

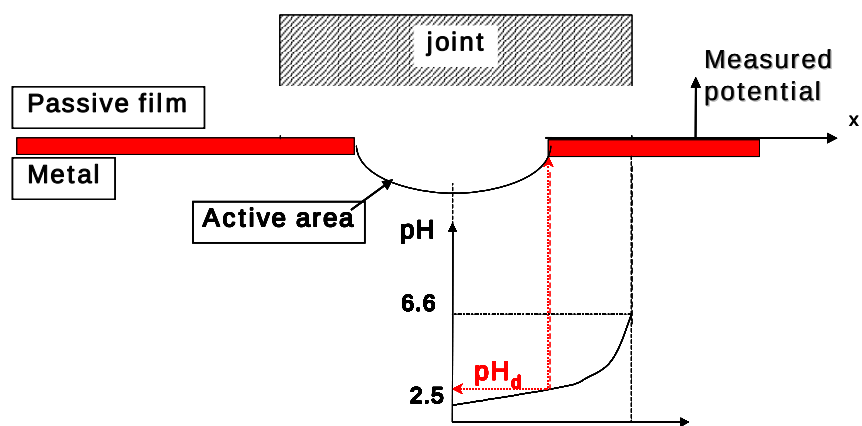


ภาพที่ 2-2 ค่ากระแสการกัดกร่อนที่จุดวิกฤตจะมีค่าสูงขึ้นกับสถานะความเป็นกรดและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ฟิล์มแตก (pitting potential) ที่ลดลงกับ จำนวนของคลอไรด์ที่เพิ่มมากขึ้น [4]



ภาพที่ 2-3 ผลกระทบของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมกับดีฟาสซิเวชันพีเอช [3]

พื้นที่บริเวณภายนอกของรอยเชื่อมดูเหมือนจะไม่ได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อน ดังภาพที่ 2-4 แสดงรูปแบบกลไกของการกัดกร่อนบริเวณภายในรอยเชื่อมที่มีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าบริเวณภายนอกรอยเชื่อม [5]



ภาพที่ 2-4 ลักษณะของกลไกการกัดกร่อนบริเวณรอยเชื่อมกับสถานะความเป็นกรด [5]

2.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิกับการกัดกร่อนภายใต้รอยเชื่อม

อิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยเชื่อมในช่วงเริ่มต้นของการเกิด การกัดกร่อนมีความสลับซับซ้อนกล่าวคือ อุณหภูมิในสารละลายจะทำให้เกิดการเร่งของกลไกของ การละลายโลหะรวมทั้งอัตราการเคลื่อนที่ของมวลหรือไอออนโลหะเกิดขึ้นได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และใน

ขณะเดียวกันในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงโดยประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส ยังเป็นช่วงที่ทำให้ ออกซิเจนเกิดการละลายในสารละลายได้น้อยกว่าในสภาวะปกติทั้งนี้โดยทั่วไป เมื่อในสภาวะที่ สารละลายมีออกซิเจนอยู่เป็นจำนวนน้อยก็จะเป็นสาเหตุดังเช่น กลไกการเริ่มต้นของการเกิดการ กัดกร่อนภายใต้รอยร้าวที่กล่าวไว้ในตอนเริ่มต้นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดกร่อนในสภาวะ อุณหภูมิที่สูง

2.3 ผลกระทบของธาตุเจือต่อการกัดกร่อน

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีส่วนผสมของโครเมียมอย่างน้อย 11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และคาร์บอนไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสม นอกเหนือจากนี้ธาตุเจือยังมีความสำคัญต่อการกัดกร่อน โดยทั่วไปธาตุเหล่านี้ได้แก่ นิกเกิล โครเมียม แมงกานีส โมลิบดีนัม ซึ่งมีความสำคัญดังนี้

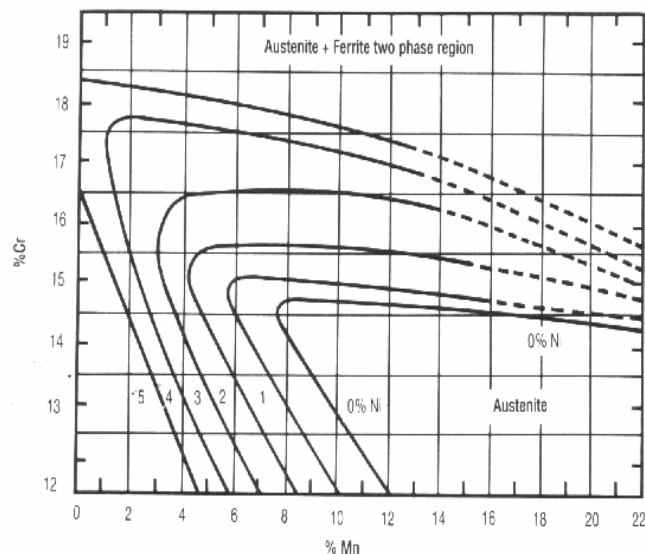
2.3.1 นิกเกิล

เป็นที่รู้กันทั่วไปว่า ธาตุ นิกเกิลเป็นธาตุที่มีส่วนช่วยให้โลหะมีโครงสร้างเป็นแบบออสติเนติก ขณะที่เมื่อมีปริมาณของนิกเกิลน้อยกว่า 5 หรือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจจะ ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นแบบมาร์เทนไซต์ [6] โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มธาตุเจือที่ช่วยให้มี โครงสร้างเป็นแบบมาร์เทนไซต์ และ ออสติเนติก ดังนี้

2.3.1.1 กลุ่มแอลฟา (α) จัดเป็นกลุ่มโครงสร้างแบบ มาร์เทนไซต์ ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม ไนโอเบียม

2.3.1.2 กลุ่มแกมมา (γ) จัดเป็นกลุ่มโครงสร้างแบบออสติเนติก ได้แก่ นิกเกิล แมงกานีส โคบอลต์ คาร์บอน ไนโตรเจน

ในช่วงที่ตลาดโลกมีปัญหาทางเศรษฐกิจอย่างรุนแรง นิกเกิลซึ่งเป็นส่วนประกอบในการผลิต เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีราคาแพง ทำให้ได้มีการศึกษาและพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการหาธาตุที่ นำมาแทนนิกเกิล เนื่องจากนิกเกิลเป็นส่วนผสมที่สำคัญในทางโครงสร้างของโลหะ จากภาพที่ 2-5 แสดงให้เห็นถึงการนำเอาแมงกานีสมาแทนที่นิกเกิล โดยจะยังช่วยให้โลหะมีโครงสร้างเป็นแบบ ออสติเนติก แมงกานีสมีคุณสมบัติช่วยให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีโครงสร้างแบบออสติเนติก แต่ อย่างไรก็ตามนิกเกิลก็ยังคงมีความสำคัญอันเนื่องมาจากแมงกานีสไม่ได้ช่วยในด้านการต้านทานการ กัดกร่อน



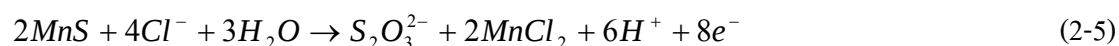
ภาพที่ 2-5 การนำแมงกานีสมาแทนที่นิกเกิลโดยส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม [6]

2.3.2 แมงกานีส

แมงกานีสเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่ามาแทนที่นิกเกิล แมงกานีสมีคุณสมบัติช่วยให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีโครงสร้างแบบออสติติก ไม่ช่วยส่งเสริมในด้านการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเมื่อเทียบกับนิกเกิล เนื่องจากเป็นที่รู้กันว่าแมงกานีสสามารถรวมตัวกับซัลไฟด์ ซึ่งมีส่วนช่วยให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

การศึกษาผลกระทบของสารฟังกินที่มีผลต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าได้แสดงให้เห็นว่าความสำคัญของการเกิดการกัดกร่อนบริเวณโดยรอบของสารฟังกิน [7] จากข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคลอไรด์ไอออนเป็นตัวกระทำทำให้ฟิล์มออกไซด์เกิดความเสียหายบริเวณสารฟังกิน ซัลไฟด์ในสารละลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการกัดกร่อน นอกเหนือจากนั้นการละลายของโลหะยังเป็นการเพิ่มสถานะความเป็นกรด และเมื่อมีความเป็นกรดที่สูงพอก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงบริเวณการกัดกร่อนภายในรอยร้าว ทำให้พื้นที่การกัดกร่อนขยายใหญ่ขึ้น [8]

จากกลไกการเกิดการกัดกร่อนที่เกิดจากซัลเฟอร์ สารฟังกินของแมงกานีสซัลไฟด์ ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในช่วงเริ่มต้น



2.3.3 โครเมียม

โครเมียมมีความสำคัญในการสร้างฟิล์มออกไซด์และในสภาวะการกัดกร่อนอุณหภูมิสูง ลักษณะของฟิล์มมีส่วนผสมของน้ำ อีออนลบและอีออนบวกของโลหะ เช่น เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม เป็นต้น และความหนาของฟิล์มออกไซด์มีความหนาโดยประมาณ 1 ถึง 10 นาโนเมตร ขึ้นอยู่กับลักษณะของโลหะ [3]

2.3.4 โมลิบดีนัม

โมลิบดีนัมมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มและแบบ-ได้รอยร้าว กลไกของโมลิบดีนัมแบ่งออกได้สองส่วนคือ ก่อนเกิดการกัดกร่อนหรือในช่วงฟิล์มออกไซด์กล่าวคือ โมลิบดีนัมช่วยเพิ่มความแข็งแรงและต้านทานการกัดกร่อน รวมทั้งยังมีส่วนทำให้การดีฟาสซิเวชันลดต่ำลง และโมลิบดีนัมยังเป็นตัวที่ช่วยลดการกัดกร่อนหรือการสร้างฟิล์มออกไซด์ขึ้นมาใหม่ในช่วงหลังจากฟิล์มเกิดความเสียหาย (repassivation process) [9]

รายงานเกี่ยวกับผลกระทบของโมลิบดีนัมที่มีผลต่อการกัดกร่อนโดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมลิบดีนัมตั้งแต่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นส่วนผสมในเหล็ก โดยนำชิ้นงานมาทดสอบในน้ำทะเล จากนั้นทำการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ 3.5 เปอร์เซ็นต์ และ 7 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าโมลิบดีนัมไม่ได้ช่วยพัฒนาการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มและการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวโดยตรง แต่เป็นตัวกระตุ้นให้โครเมียมและนิกเกิลในโลหะมีการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น [10]

การศึกษาบริเวณฟิล์มออกไซด์ของโลหะ โดยการตรวจวัดปริมาณของอีออนโดยเฉพาะอย่างยิ่งโมลิบดีนัมของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้เครื่องมือ X-Ray Photo-Electron Spectroscopy (XPS) โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบในสารละลายไฮโดรคลอริกที่ 1 โมลาร์ เพื่อทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นความสำคัญของโมลิบดีนัมในการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม และในบริเวณฟิล์มออกไซด์ได้มีการสำรวจพบ Cr^{3+} Fe^{2+} Ni^{2+} Mo^{6+} และ Cl^- นอกเหนือจากนั้นยังได้พบว่าเมื่อเพิ่มโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้ความหนาของฟิล์มออกไซด์หนาขึ้น [11]

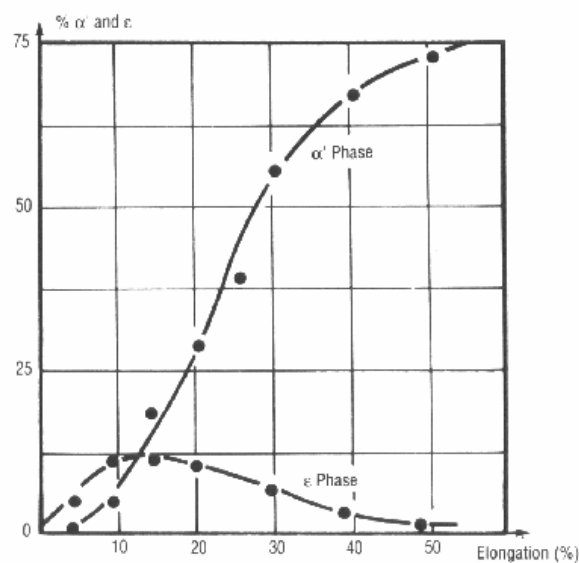
การศึกษาโดยใช้เครื่องมือ XPS เพื่อศึกษาผลกระทบของโมลิบดีนัมโดยการนำชิ้นงานทดสอบในสารละลายไฮโดรคลอริก เพื่อทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ จากการสำรวจโครงสร้างของฟิล์มออกไซด์สามารถจำแนกชั้นของฟิล์มออกไซด์ได้ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ประกอบด้วย MoO_4^{2-} และส่วนประกอบของน้ำ $\text{MoO}(\text{OH})_2$ จะอยู่บริเวณชั้นนอกซึ่งสัมผัสกับสารละลาย [14] นอกเหนือจาก MoO_4^{2-} จะทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งชั้นฟิล์มออกไซด์โดยจะแยกอีออนลบและอีออนบวกออกจากกัน ซึ่งทำให้เนื่องต่อการกัดกร่อน จากการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของโมลิบดีนัมเพิ่มขึ้น

ระยะเวลาการฟักตัวของการกัดกร่อน (incubation period) ก่อนการเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงจะยาวนานยิ่งขึ้น [12]

2.4 ผลกระทบของการแปรรูปเย็นต่อการกัดกร่อน

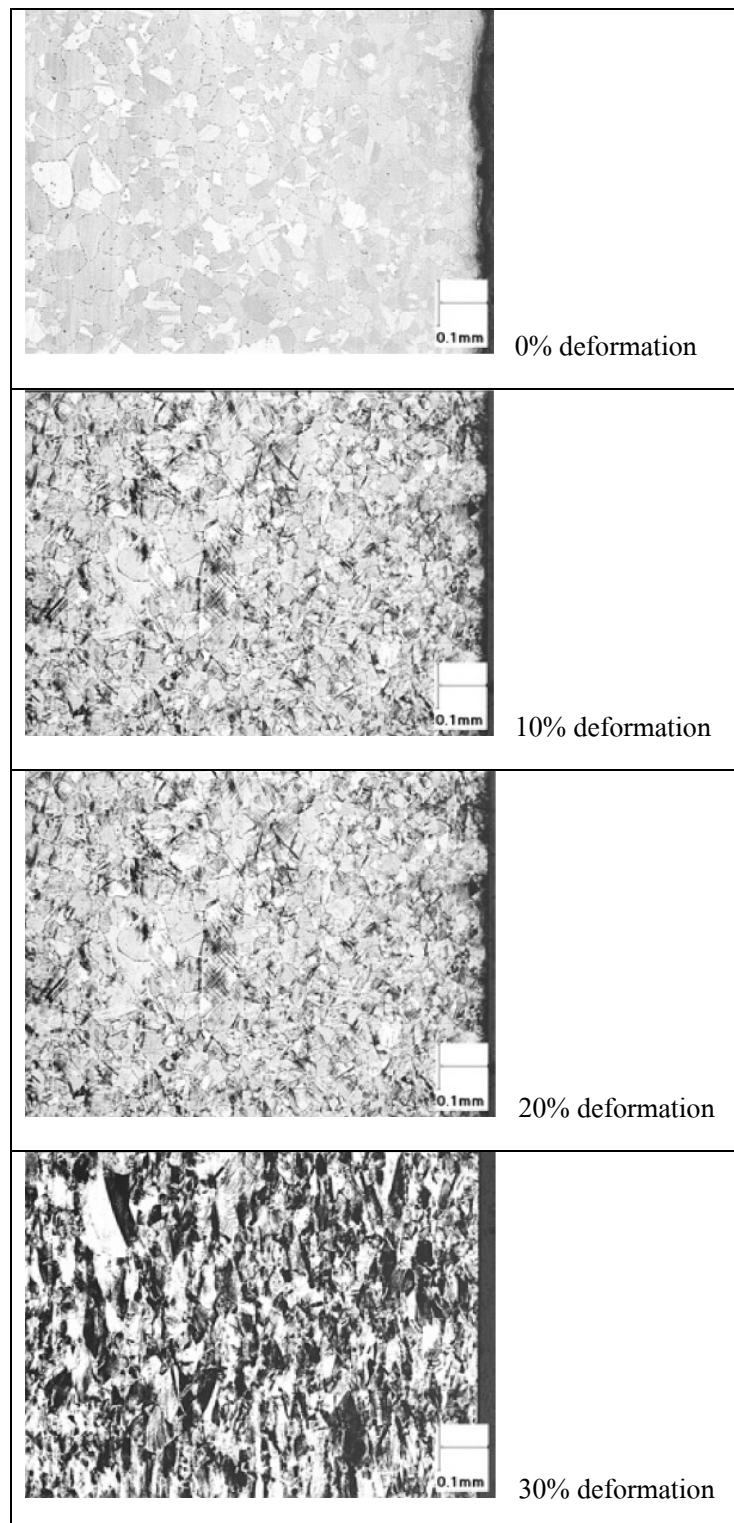
2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของโลหะ

ลักษณะโดยทั่วไปของการแปรรูปเย็นในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างแบบออสติเนติก เมื่อผ่านการรีดจะทำให้เกิดเป็นมาร์เทนไซต์ แบบ non ferromagnetic (ϵ) และแบบ ferromagnetic-center cubic (α') ภาพที่ 2-6 แสดงจำนวนของมาร์เทนไซต์กับความเครียด (strain) ที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยจะเกิด ϵ เฟส ก่อน α' เฟส เนื่องจากสถานะที่ α' โครงสร้างจะมีความเสถียรมากกว่า ϵ เฟส การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจากเฟส γ ไปเป็น ϵ และ α' ยังขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีอื่นๆ ในโครงสร้าง เช่น นิกเกิล โครเมียม และคาร์บอน เป็นต้น



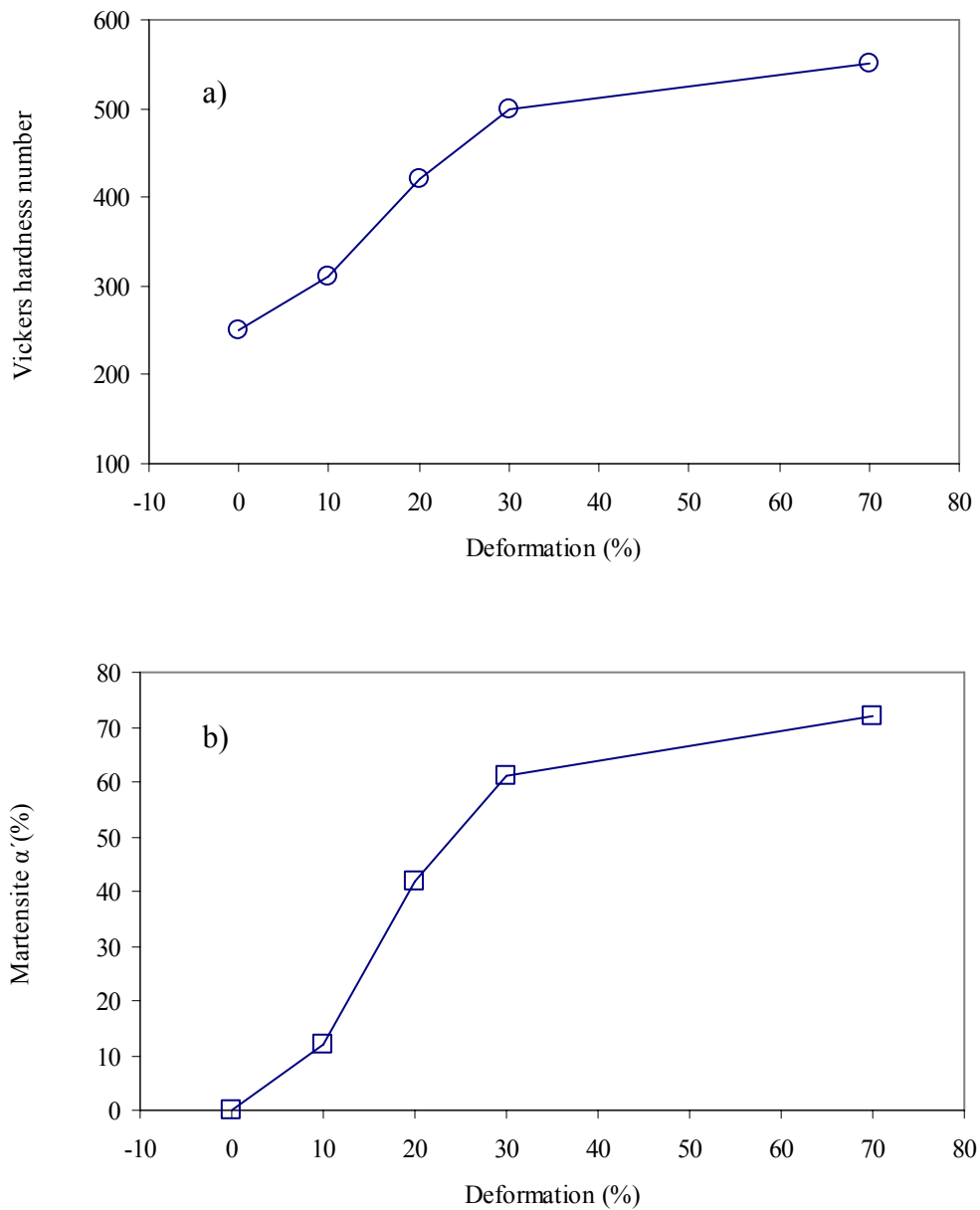
ภาพที่ 2-6 การเปลี่ยนแปลงของ α' และ ϵ กับการเพิ่มความเครียดของเหล็กกล้าไร้สนิม [6]

การเพิ่มอัตราการรีดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างแบบออสติเนติก จะมีผลทำให้จำนวนของมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้นซึ่งสามารถแบ่งแยกความแตกต่างของมาร์เทนไซต์ซึ่งสังเกตได้จากเงาสีดำ และลักษณะของมาร์เทนไซต์จะมีลักษณะเรียวยาวดังภาพที่ 2-7



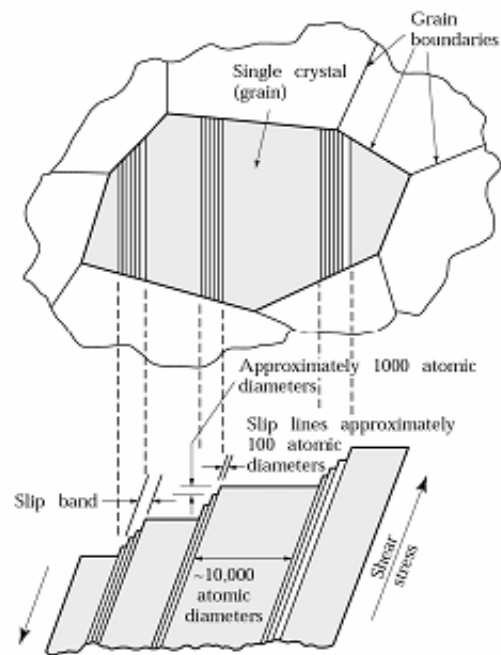
ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ของมาร์เทนไซต์และอัตรการรีดของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบ Low Ni จากศูนย์วิจัยของบริษัท Ugine [13]

ภาพที่ 2-8 a) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง (vickers hardness) ของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 4 ชนิดอันเนื่องมาจากการรีดเย็น b) แสดงความสัมพันธ์ของการเกิดมาร์เทนไซต์ซึ่งเพิ่มขึ้นกับอัตราการรีดเย็น [13]



ภาพที่ 2-8 ผลกระทบของการรีดเย็นต่อพฤติกรรมของโลหะ a) แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งและอัตราการรีดเย็น b) แสดงความสัมพันธ์ของมาร์เทนไซต์ซึ่งได้เพิ่มขึ้นกับอัตราการรีด [13]

เมื่อทำการรีดเย็นสิ่งที่จะมีผลกระทบตามมาก็คือ ความบกพร่องของโลหะ สำหรับความไม่สมบูรณ์เชิงเส้นที่เกิดขึ้นอาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ ดิสโลเคชัน (dislocation) ซึ่งเกิดจากความบิดเบี้ยวของโครงสร้าง สำหรับระยะที่เพิ่มขึ้นรอบๆ ดิสโลเคชัน นี้ เรียกว่า สลิป (slip) แสดงขนาดของสลิปที่เกิดขึ้นบนเกรนอันเนื่องมาจากความเค้นเฉือน สลิปแบบแถบ (slip band) จะประกอบไปด้วยหลายๆ สลิปเชิงเส้น (slip line) เข้าด้วยกัน ดังในภาพที่ 2-9



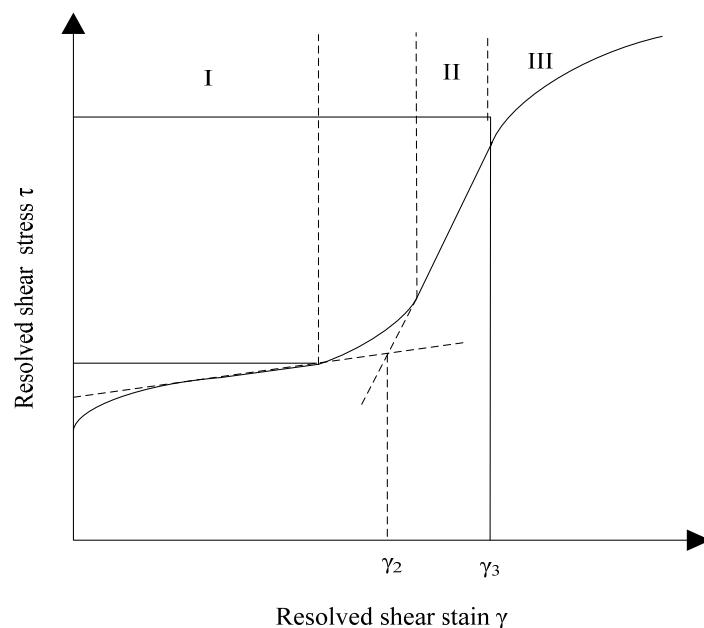
ภาพที่ 2-9 แสดงขนาดของสลิปที่เกิดขึ้นบนเกรนอันเนื่องมาจากความเค้นเฉือน สลิปแบบแถบจะประกอบไปด้วยหลายๆ สลิปเชิงเส้นเข้าด้วยกัน

ภาพที่ 2-10 ได้แสดงให้เห็นถึงเส้นความชันของโลหะบริสุทธิ์แบบโครงสร้างเดี่ยว ซึ่งสามารถแบ่งสภาวะการเกิดได้สามขั้นตอนด้วยกัน

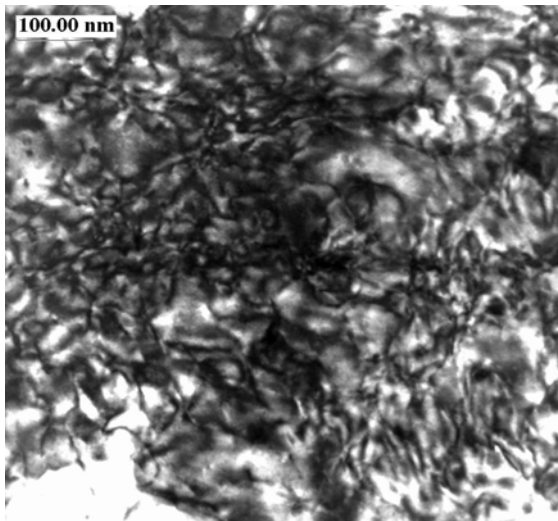
ขั้นที่หนึ่งจะเป็นสภาวะที่ง่ายต่อการเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมและการเกิดสลิปแบบแถบ เมื่อมีการให้ความเค้นเฉือนแก่วัสดุ

ขั้นที่สองจะเป็นสภาวะที่มีการเพิ่มแรงเฉือนอย่างต่อเนื่องจากสภาวะแรก ในขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดสลิปเพิ่มขึ้นรวมทั้งการฟอร์มตัวที่ก่อให้เกิดการดิสโลเคชัน นอกเหนือจากนั้นในขั้นตอนนี้ดังกล่าวยังจะเกิดการกองทับกันของดิสโลเคชัน (piled-up dislocations)

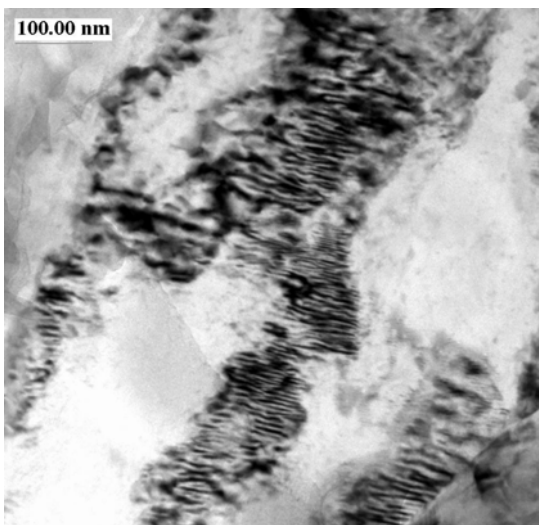
ขั้นที่สามเป็นสถานะที่มีการลดลงของความเครียดภายในโลหะและในกระบวนการดังกล่าว เรียกว่า ไดนามิกรีโคปเวอรรี (dynamic recovery stage) จากการที่มีหลายๆ ขั้นตอนและความแตกต่างของการแปรรูปเย็น จะทำให้เกิดพลังงานความเค้นอยู่ในวัสดุ สำหรับพลังงานที่เก็บสะสม (stored- energy per unit volume) ที่เกิดในขั้นที่สองจะมีมากกว่าสถานะที่สาม กล่าวคือ สถานะที่สองมีพลังงานที่เก็บสะสมถึง 95 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นพลังงานที่เก็บสะสมจะลดลงในสถานะที่สามเหลือพลังงานที่เก็บสะสมประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 2-11 การดิสโลเคชันมีความหนาแน่นสูงขึ้นกับความเค้นและคงที่เมื่อถึงช่วงไดนามิกรีโคปเวอรรี โครงสร้างผลึกที่มีการเปลี่ยนรูปอันเนื่องมาจากความเค้นตกค้าง (residual stress) ที่ยังคงอยู่ในโครงสร้างบริเวณที่เกิดความบกพร่องของโครงสร้าง จะนำไปสู่การเก็บสะสมของพลังงานที่สูงขึ้นในช่วงที่เกิดการกองทับกันของดิสโลเคชันและจะมีผลต่อการกัดกร่อนที่รวดเร็วกว่าโครงสร้างปกติ [14]



ภาพที่ 2-10 ลักษณะทั่วไปของความชันของ face-center cubic ของผลึกเดี่ยว [15]



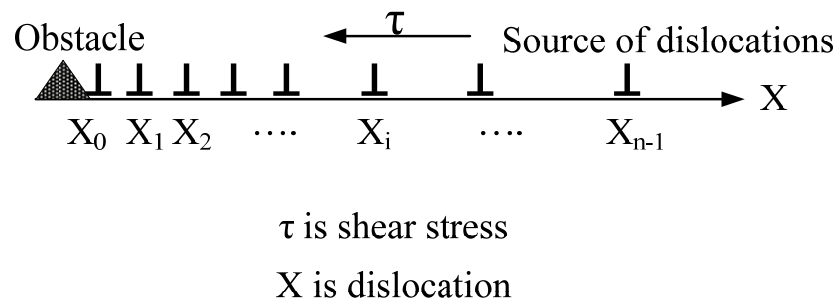
a)



b)

ภาพที่ 2-11 พฤติกรรมของดิสโลเคชันในแมกนีเซียมอัลลอย AM50 alloy โดยการเพิ่มความเค้นและความเครียดให้กับโลหะ a) ลักษณะของดิสโลเคชันในช่วงไดนามิกรีโคปเวอรี่ การแปรรูปเย็นที่ 6.8% b) การกองทับกันของดิสโลเคชัน [14]

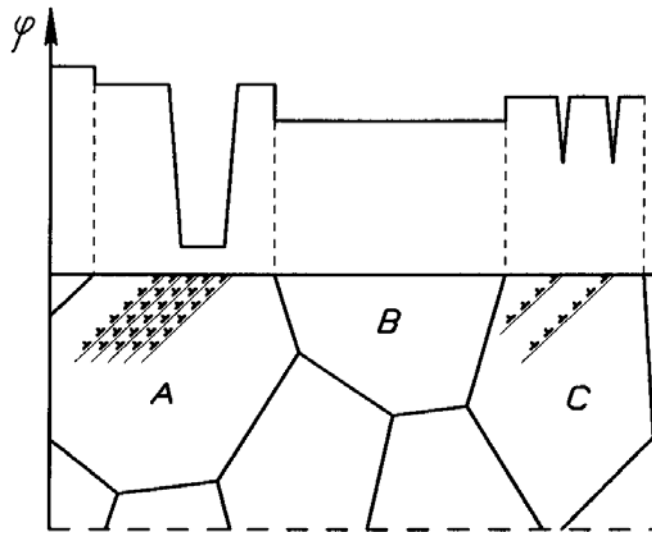
การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันที่เมื่อมีสิ่งกีดขวางและจะทำให้เกิดการกองของดิสโลเคชันดัง ภาพที่ 2-12 โดยพื้นที่บริเวณดังกล่าวจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของพลังงานสะสม บริเวณที่เกิดการกอง ทับกันของดิสโลเคชันจะมีค่าของพลังงาน เมื่อดิสโลเคชันเคลื่อนตัวมาใกล้กันมากยิ่งขึ้นก็จะส่งผล ให้มีความเค้นสูงสะสมสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การกีดกร่อน [14]



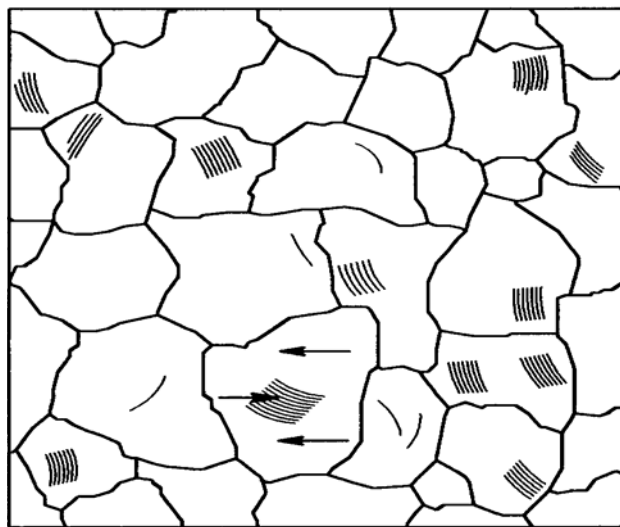
ภาพที่ 2-12 รูปแบบพฤติกรรมของดิสโลเคชันจะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีสิ่งกีดขวางและจะทำให้เกิดการกองของดิสโลเคชัน [14]

2.4.2 ลักษณะพฤติกรรมของการแปรรูปเย็นต่อการกีดกร่อน

โครงสร้างของผลึกสามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการแปรรูปเย็น การเปลี่ยนแปลงนี้เอง มาจากแรงทางกลจะนำมาซึ่งการบิดเบี้ยวและการเกิดสลิปในโครงสร้าง การเกิดการกีดกร่อนจะมี การเกิดการกีดกร่อนได้ง่ายบริเวณสลิป ดังภาพที่ 2-13 a) แสดงเกรนของเหล็กที่ประกอบด้วยสามเกรน คือ เกรน A เกรน B เกรน C โดยแต่ละเกรนจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกันแต่จะมีความแตกต่างของการ เกิด สลิป โดยให้ เกรน A จะมีสลิปมากกว่า เกรน C และเกรน B ตามลำดับ สิ่งที่สำคัญที่ได้แสดง ให้เห็นก็คือ ศักย์ไฟฟ้าของวัสดุจะลดต่ำลงกับเกรนที่มีสลิป กล่าวคือ เกรน A จะมีศักย์ไฟฟ้าของ วัสดุต่ำกว่าของ เกรน C และเกรน B ตามลำดับ และภาพที่ 2-13 b) แสดงการวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะที่ บริเวณลูกศรของแมกนีเซียมอัลลอย armco-iron surface



a)



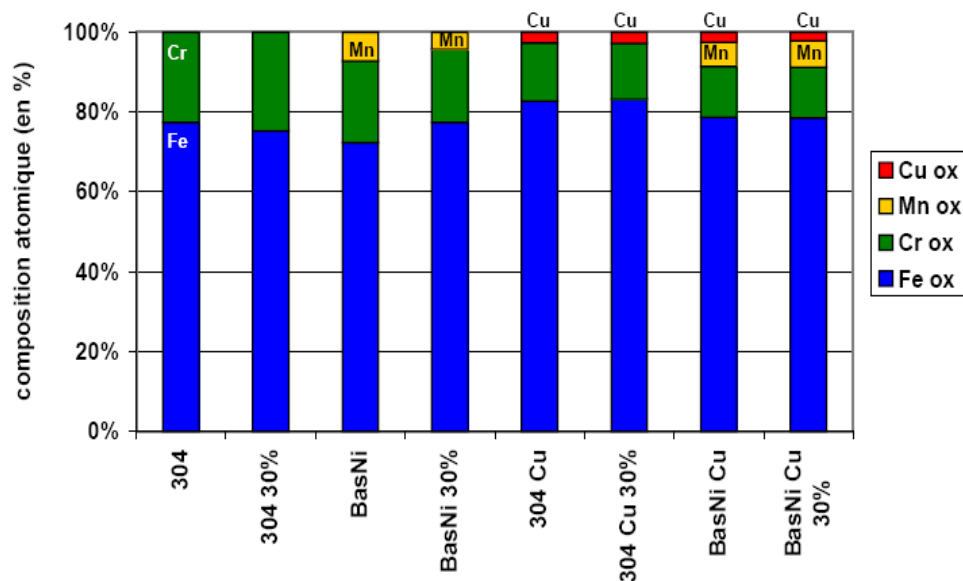
b)

ภาพที่ 2-13 ความสัมพันธ์ของการเลือกเกิดการกัดกร่อนบริเวณสลิป a) แสดงความสัมพันธ์ของ ศักย์ไฟฟ้าและสลิปที่เกิดขึ้นบนเกรนของโลหะ ϕ คือศักย์ไฟฟ้าเฉพาะที่เกิดบนสลิป b) ลักษณะของพื้นผิวที่เกิดขึ้นของแมกนีเซียมอัลลอย armco-iron surface และการวัด ศักย์ไฟฟ้า [14]

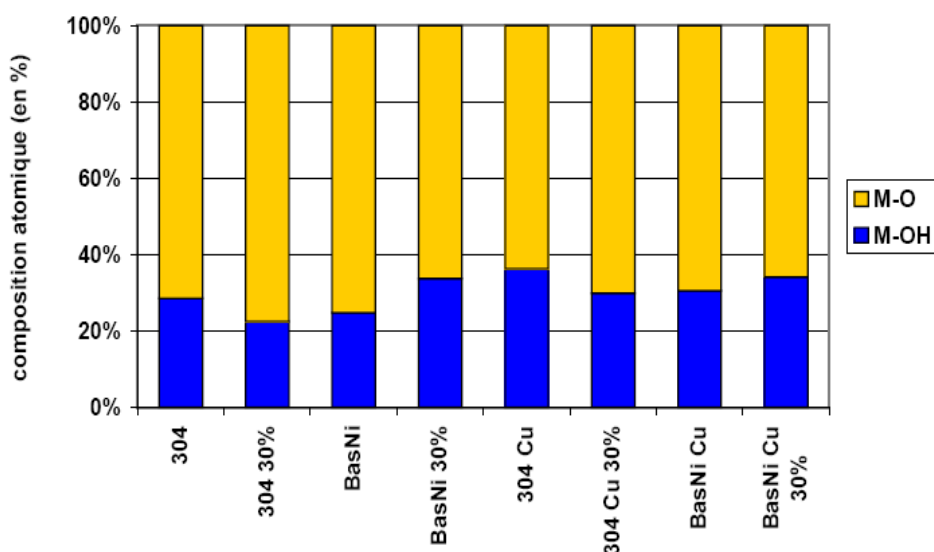
จากการศึกษาการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้วิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (open circuit potential) หลังจากนั้นใช้เครื่องมือ TEM เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้าง ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ซึ่งพบว่าเมื่อ เกิดการกองทับกันของดิสโลเคชันที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่เมื่อมีการรีดเย็นจนถึง 70 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างดูเหมือนเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกรีโคปเวอร์รี นอกเหนือจากนั้นยังได้มีศึกษาในช่วงเริ่มต้นการเกิดการกัดกร่อน ซึ่งได้พบความสัมพันธ์ของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับการดิสโลเคชันบริเวณสารฝังใน กล่าวคือ เมื่อเกิดการกองทับกันของการดิสโลเคชันจะพบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ที่เกิดขึ้นที่บริเวณสารฝังในเป็นจำนวนมากกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณที่ไม่เกิดการกองทับกันของดิสโลเคชัน [13]

การศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม 301 ในสารละลายกรดซัลฟิวริก (sulphuric acid) และคลอไรด์ โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของการกัดกร่อนกับ พารามิเตอร์ ได้แก่ ปริมาณของมาร์เทนไซด์ ค่าความแข็งของวัสดุ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า กระแสของการกัดกร่อนที่ฟิล์ม (passivity current) ไม่ได้เพิ่มขึ้นโดยตรงกับมาร์เทนไซด์ แต่จากการใช้กรดในการกัดได้แสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนแบบที่ขอบเกรน โดยความลึกของของการกัดกร่อนดูเหมือนเพิ่มขึ้นกับการรีดเย็นที่สูงขึ้น [16]

จากการใช้เครื่อง ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) เพื่อทำการวิเคราะห์ฟิล์มออกไซด์ของ ทองแดง แมงกานีส โครเมียม และ เหล็ก กล่าวคือปริมาณออกไซด์ต่างๆที่ 0 เปอร์เซ็นต์การรีด และ 30 เปอร์เซ็นต์การรีด มีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 2-14 แสดงปริมาณส่วนผสมที่เกิดขึ้นในฟิล์มออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของธาตุต่างในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการรีดเย็นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีความหนาของฟิล์มมีค่าที่ใกล้เคียงเช่นกัน ดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-14 ส่วนผสมของออกไซด์ของ ทองแดง แมงกานีส โครเมียม และเหล็กในเหล็กกล้าไร้-
สนิมที่ผ่านการรีดเย็นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์ [13]



ภาพที่ 2-15 ส่วนผสมที่เกิดขึ้นในฟิล์มออกไซด์และไฮดรอกไซด์ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการรีด
เย็นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์ [13]

2.5 บทสรุป

จากข้างต้นได้กล่าวถึงการแบ่งสภาวะของการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวโดยสามารถแบ่งออก
ได้สองส่วนคือ ช่วงเริ่มต้นของการกัดกร่อนและช่วงที่เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงและรวดเร็ว ลำดับ
แรกจะให้ความสำคัญจากผลกระทบของธาตุเจือได้แก่ โครเมียม นิกเกิล และ โมลิบดีนัม ที่มี
ความสำคัญต่อค่า ศีพาสซีเวชันพีเอช และความต้านทานต่อการกัดกร่อน ผลกระทบของการกัด

กร่อนต่อการแปรรูปเย็น ซึ่งเกิดจากการแปรรูปเย็นจะนำไปสู่ผลกระทบต่อโครงสร้างและการดิสโลเคชัน โดยปกติแล้วโครงสร้างของผลึกที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจะยังคงมีความเค้นตกค้าง (residual stress) อยู่ภายในโครงสร้างและจะเกิดการเก็บสะสมของพลังงานอื่นเนื่องจากความเค้นสะสมที่สูงขึ้นในช่วงที่เกิดการกองทับกันของการดิสโลเคชันซึ่งจะมีผลต่อการกัดกร่อนที่รวดเร็วกว่าโครงสร้างปกติ

ในการศึกษานี้จะให้ความสำคัญของผลกระทบของธาตุเจือและผลกระทบของการแปรรูปเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลต่อการกัดกร่อน โดยทั้งสองผลกระทบจะทำการศึกษาการกัดกร่อนในสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวเฉพาะในช่วงที่เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงและรวดเร็ว ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ขอบเขตของการศึกษาการกัดกร่อนในสภาวะที่จำลองขึ้นแบบภายใต้รอยร้าว

งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้	สิ่งที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้
- ผลกระทบของธาตุเจือต่อค่า ดิฟฟูซิเวชัน [3,5] - การกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว [1,2,3,17] - ผลกระทบของนิกเกิลต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวของเหล็กกล้าไร้สนิม [12,18,19] - ผลกระทบของโมลิบดีนัมต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม [11,12,13] - ผลกระทบของสารฟองในเนื่องจากแมงกานีสซัลไฟด์ในช่วงช่วงเริ่มต้นของการกัดกร่อน [8,20,21] - ผลกระทบของการกัดกร่อนต่อการแปรรูปเย็นต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม [13,14,16,22]	- ผลกระทบของธาตุเจือโดยเฉพาะอย่างยิ่ง นิกเกิล และ โมลิบดีนัม ต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวในช่วงที่เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงและรวดเร็ว - ผลกระทบของการกัดกร่อนต่อการแปรรูปเย็น ของเหล็กกล้าไร้สนิม Low Ni ต่อการกัดกร่อนแบบภายใต้รอยร้าวในช่วงที่เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงและรวดเร็ว

บทที่ 3

ขั้นตอน และวิธีดำเนินการทดลอง

การวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือและการแปรรูปเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลกระทบต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว โดยนำชิ้นงานมาทดสอบภายใต้สภาวะการทดลองแบบศักย์ไฟฟ้ากัฏกร่อน (open circuit potential measurement) โดยชิ้นงานจะถูกนำมาทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังจากการทดลองทางเคมีไฟฟ้าหรือวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากัฏกร่อนแล้วนำไปทำการตรวจวัดหาพื้นที่ผิวของการกัดกร่อนโดยกล้องจุลทรรศน์ สำหรับขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลองจะประกอบด้วย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- 3.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม A1, A2, B1, B2, AISI 304, AISI 430 และ AISI 444
- 3.1.2 เซลล์เคมีไฟฟ้า
- 3.1.3 เครื่องมือวัดกระแสและศักย์ไฟฟ้า ของบริษัท Alpes Instruments®
- 3.1.4 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเก็บและประมวลผล Mustig จาก Gresilog®
- 3.1.5 อิเล็กโทรดอ้างอิง คือ saturated calomel electrode (SCE)
- 3.1.6 ชุดจำลองสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว
- 3.1.7 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ
- 3.1.8 กล้องจุลทรรศน์
- 3.1.9 เครื่องวัดกระดาดทราย
- 3.1.10 เครื่องอัลตราโซนิก
- 3.1.11 ไขควงชนิดปรับแรงบิด
- 3.1.12 เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง พีเอชมิเตอร์ (pH meter)
- 3.1.13 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.02 และ 2 โมลาร์
- 3.1.14 สารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.01, 0.1 และ 1 โมลาร์
- 3.1.15 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.01, 0.1 และ 1 โมลาร์
- 3.1.16 สารละลายอะซิโตน/เอทานอล
- 3.1.17 น้ำกลั่น

3.2 การเตรียมวัสดุ

3.2.1 เตรียมวัสดุสำหรับการศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือ

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือในเหล็กกล้าไร้สนิมในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของนิกเกิล (Nickel) และโมลิบดีนัม (Molybdenum) ที่ส่งผลกระทบต่อทางด้านทานการกัดกร่อนในสภาวะการจำลองของการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว สำหรับกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาทดสอบนี้ คือ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนติกที่มีปริมาณนิกเกิลเป็นส่วนผสมอยู่จำนวนน้อยหรือในทางการค้าเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิมแมงกานีส ซึ่งนำมาจากสองบริษัท แต่ละบริษัทจะมีส่วนผสมของปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใกล้เคียงกัน โดยจะทำการศึกษาที่ส่วนผสมของนิกเกิลในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (A1 กับ B1) และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (A2 กับ B2) นอกเหนือจากนั้นในการทำวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าจากกลุ่มดังกล่าวข้างต้น กับเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในทางการค้า (AISI 304) ซึ่งมีนิกเกิลเป็นส่วนผสมโดยประมาณ 8.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ในส่วนของอิทธิพลของปริมาณของโมลิบดีนัมจะใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก คือ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 430 และ 444 (AISI 430 และ AISI 444) โดยเหล็กกล้าไร้สนิมดังกล่าวมีความแตกต่างของปริมาณของโมลิบดีนัม ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดลองทางด้านส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นผลการทดลองจาก [5] แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิด

เหล็กกล้า ไร้สนิม	ส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก										
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	S*	N	Nb	Ti
A1	0.10	-	9.70	1	16	-	1.6	82	0.16	-	-
A2	0.06	-	7.20	4.00	16.10	-	1.7	31	0.07	-	-
B1	0.10	-	9.00	1.20	15.2	-	1.70	<2	0.12	-	-
B2	0.05	-	7.10	4.10	15.2	-	1.5	5	0.06	-	-
AISI 304	0.04	0.41	1.42	8.67	18.19	0.21	0.39	10	0.04	0.06	0.01
AISI 430	0.04	0.31	0.39	0.16	16.4	0.03	0.04	15	0.03	0.01	0.01
AISI 444	0.01	0.46	0.38	0.11	17.7	2.07	0.06	5	0.01	0.30	0.17

*หมายเหตุ ส่วนผสมของซัลเฟอร์(S) เป็น ppm โดยน้ำหนัก

3.2.2 เตรียมวัสดุสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการแปรรูปเย็น

การศึกษาอิทธิพลของการแปรรูปเย็นจะใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสติเนติกที่มีปริมาณของนิเกิลเป็นส่วนผสมอยู่จำนวนน้อย โดยเหล็กกล้าไร้สนิมดังกล่าวจะถูกนำไปผ่านการแปรรูปเย็น (cold working) หรือทำการรีดที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ จากการที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสติเนติกดังกล่าวเมื่อนำไปผ่านกระบวนการรีดเย็นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างภายในเป็นมาร์เทนไซต์ (ferromagnetic center cubic (α')) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของการแปรรูปเย็นในสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว ผลการทดลองทางด้านส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นผลการทดลองจาก [5] แสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ส่วนผสมของธาตุต่างๆในเหล็กกล้าไร้สนิมในการทดลอง

เหล็กกล้าไร้สนิม	ส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก								
	Mn	Ni	Cr	Mo	Si	Cu	S*	Al	N
Low Ni	7.30	1.65	16.41	0.05	0.81	0.19	9	0.01	0.24

*หมายเหตุ ส่วนผสมของซัลเฟอร์(S) เป็น ppm โดยน้ำหนัก

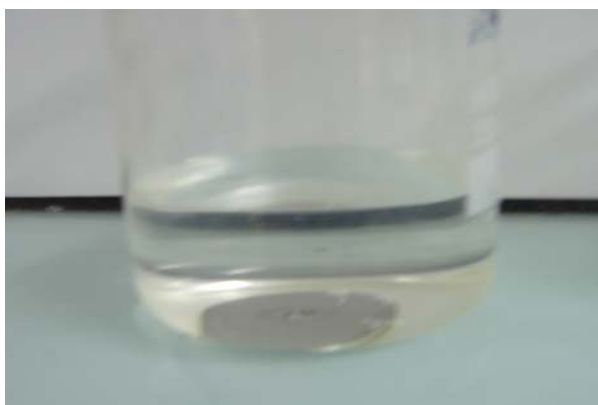
3.3 การเตรียมอุปกรณ์

3.3.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบทางเคมีไฟฟ้า

ชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบเตรียมโดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาตัดเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3-1 และ 3-2 หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำการขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 400, 600, 800 และ 1200 ตามลำดับดังภาพที่ 3-1 แล้วทำความสะอาดด้วยสารละลาย อะซิโตน/เอทานอล เพื่อล้างคราบไขมันภายใต้เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นเก็บชิ้นงานไว้ในบรรยากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลายของโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสภาวะพีเอช (pH) 6.6 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ในอุณหภูมิห้อง เพื่อให้เกิดชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เสถียร ดังภาพที่ 3-2



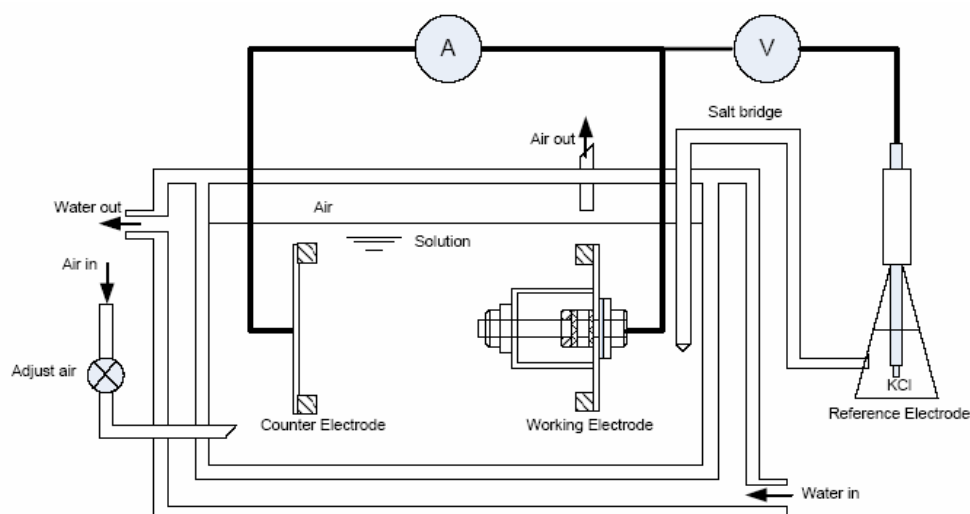
ภาพที่ 3-1 การตัดผิวด้วยกระดาษทราย



ภาพที่ 3-2 ชิ้นงานแช่ในสารละลายของโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสภาวะ
พีเอช 6.6 ณ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

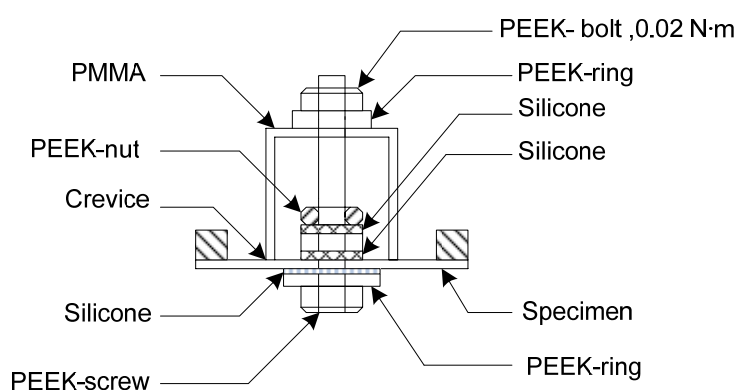
3.3.2 การทดสอบทางเคมีไฟฟ้า

ภาพที่ 3-3 แสดงรูปแบบของการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากักร่อน ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรดวัดกระแส (counter electrode) และขั้วแอโนด (anode electrode) หรือในที่นี้เรียกว่า ขั้วอิเล็กโทรดทำงาน (working electrode) โดยขั้วดังกล่าวเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือมีการละลายของโลหะ เมื่อมีการเกิดการกักร่อนบริเวณขั้วอิเล็กโทรดทำงาน ก็จะทำให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรดทำงานไปยังขั้วอิเล็กโทรดวัดกระแส ส่วนอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) ในที่นี้คือ saturated calomel electrode (SCE) จะทำการวัดเปรียบเทียบเฉพาะศักย์ไฟฟ้า สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะแบบสองชั้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของระบบการทดลองได้



ภาพที่ 3-3 ลักษณะของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

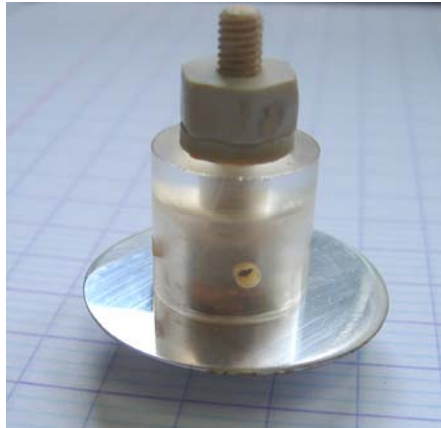
ในการศึกษานี้จะใช้รูปแบบของการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน ตามมาตรฐาน ASTM G 78 จากภาพที่ 3-4 และ 3-5 แสดงรูปแบบของข้อผิดพลาดเพื่อควบคุมให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณใต้รอยต่อระหว่างชิ้นงานกับพลาสติก สำหรับการทำให้การกัดกร่อนจะยึดติดระหว่างพลาสติกกับชิ้นงานโดยควบคุมให้เกิดแรงกดประมาณ 0.02 นิวตัน-เมตร ภาพที่ 3-6 แสดงตัวอย่างการเกิดการกัดกร่อนบริเวณภายใต้รอยซ้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 409 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง [23]



PMMA = Polymethyl methacrylate

PEEK = Polyetheretherketone

ภาพที่ 3-4 ลักษณะของข้อผิดพลาดในการทำงานเพื่อทำให้เกิดสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน

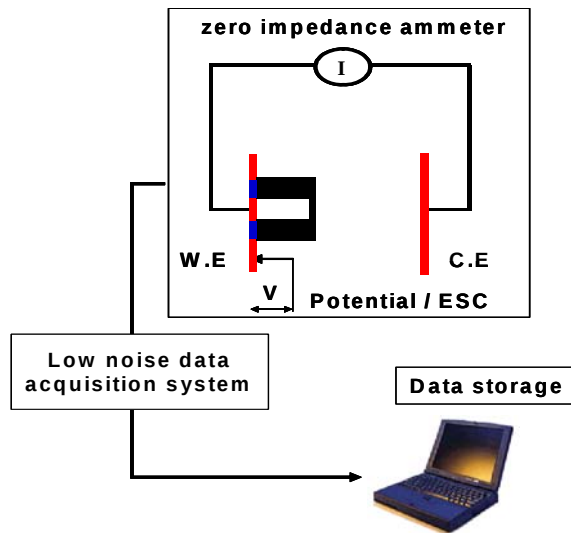


ภาพที่ 3-5 ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดทำงานที่จะนำไปแช่ในสารละลายของโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 3-6 การเกิดการกัดกร่อนบริเวณภายใต้รอยซ้อนของขั้วอิเล็กโทรดทำงานของเหล็กกล้าไร้-
สนิม AISI 409 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50°C
เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง [23]

ภาพที่ 3-7 แสดงรูปแบบของวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน โดยทั้งขั้วอิเล็กโทรดทำงาน (WE) และพื้นที่ของอิเล็กโทรดวัดกระแส (CE) จะมีการเชื่อมต่อกันโดยไม่มี ความต้านทานทางไฟฟ้า ในทางปฏิบัติเมื่อเกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วทำงาน ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.3.2 ก็จะทำให้เกิดกระแสปรากฏขึ้นที่แอมมิเตอร์จากนั้นข้อมูลจะถูกนำไปเก็บไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นใช้ซอฟต์แวร์ ชื่อ โปรแกรม Mustig เพื่อประมวลผล สำหรับค่ากระแสที่ผ่านการประมวลผลด้วยโปรแกรม Mustig คือ ค่ากระแสการกัดกร่อน (I_m ; แอมแปร์)



ภาพที่ 3-7 รูปแบบของอุปกรณ์การวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากักร่อนและการเก็บข้อมูลในการทดลอง

3.4 ลักษณะของรูปแบบสัญญาณ

3.4.1 การทำสมดุลของประจุ (Charge balance)

จากภาพที่ 3-8 แสดงการทำสมดุลของประจุ ระหว่างขั้วขั้วอิเล็กโทรดทำงานแทนด้วย Q_1 และพื้นที่ของอิเล็กโทรดวัดกระแส แทนด้วย Q_2 ดังสมการดังนี้

$$\frac{dQ_1}{dt} = -I_a + I_k + I_m = C \cdot S \frac{dV}{dt} \quad (3-1)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = I_k + I_m = CS \frac{dV}{dt} \quad (3-2)$$

กำหนดให้

Q คือ ประจุไฟฟ้า (C)

C คือ ความจุของประจุไฟฟ้า ($F \cdot cm^{-2}$)

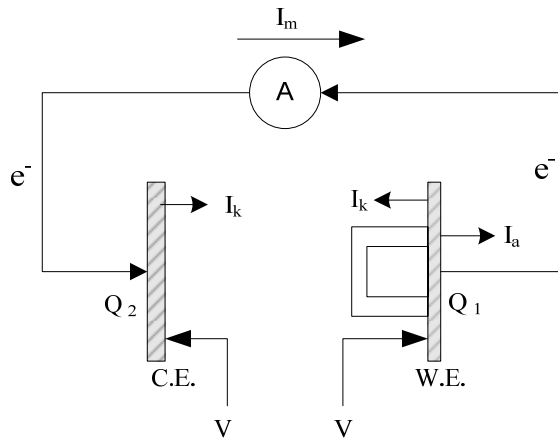
S คือ พื้นที่ของชิ้นงานที่สัมผัสกับสารละลาย (WE และ CE) (cm^2)

I_m คือ กระแสการกักร่อนที่วัดได้จากแอมป์มิเตอร์ (A)

I_a คือ กระแสการกักร่อนของปฏิกิริยาอะโนดิก (A)

I_k คือ กระแสการกักร่อนของปฏิกิริยาแคโทดิก (A)

V คือ ศักย์ไฟฟ้า (V)



ภาพที่ 3-8 การทำสมดุลของประจุ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทำงาน และอิเล็กโทรดวัดกระแส

จากการทำสมดุลประจุซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรดังต่อไปนี้ ขั้วอิเล็กโทรดทำงานจะประกอบด้วยสองส่วนคือ พื้นที่ของบริเวณใต้รอยซ้อนหรือส่วนที่พลาสติกสัมผัสกับอิเล็กโทรด (confined area) จะมีพื้นที่ประมาณ 81.6 ตารางมิลลิเมตร และพื้นที่บริเวณที่ไม่สัมผัสกับพลาสติก (free area) หรือ S_{WE} จะมีพื้นที่ประมาณ 283 ตารางมิลลิเมตร สำหรับพื้นที่ของอิเล็กโทรดวัดกระแส หรือแทนด้วย S_{CE} จะมีพื้นที่ประมาณ 415 ตารางมิลลิเมตร ในที่นี้จะให้พื้นที่ที่มีความเสถียร (cathodic area) แทนด้วย S_k หาได้จากสมการที่ 3-3 กระแสการกัดกร่อนนั้นจะได้อัตราการกัดกร่อนหรือกระแสความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่การกัดกร่อน (anodic current density) ได้ดังสมการที่ 3-7

$$S_k = S_{CE} + S_{WE} \quad (3-3)$$

$$I_{anodic} = I_{cathodic} = I_{crevice} = (S_{CE} + S_{WE}) \cdot j_k \quad (3-4)$$

$$I_m = S_{CE} \times j_k \quad (3-5)$$

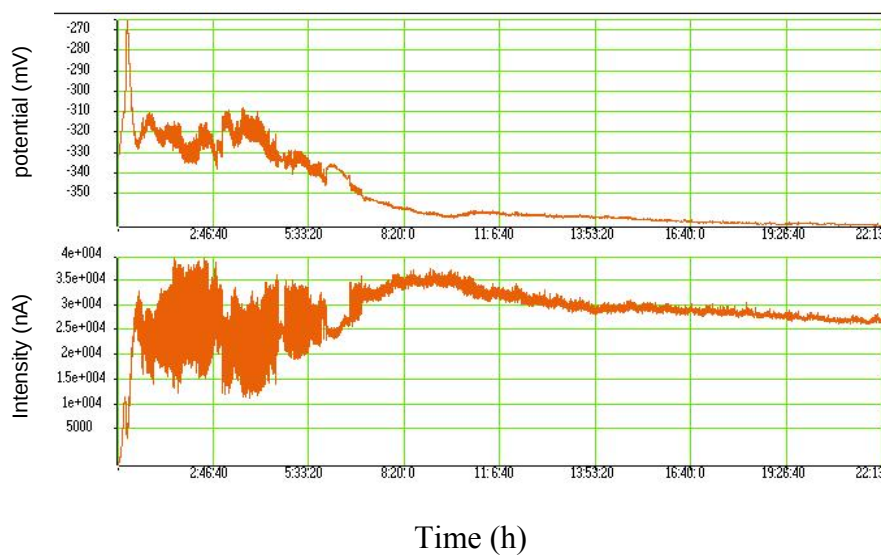
$$I_{crevice} = \left(1 + \frac{S_{WE}}{S_{CE}}\right) \cdot I_m \quad (3-6)$$

$$j_a = \frac{I_{crevice}}{S_a} \quad (3-7)$$

กำหนดให้ S_a คือ พื้นที่บริเวณที่เกิดกัดกร่อน (cm^2)
 j_a คือ อัตราการกัดกร่อนของปฏิกิริยาอะโนดิก (A/cm^2)
 j_k คือ อัตราการกัดกร่อนของปฏิกิริยาคาโทดิก (A/cm^2)

3.4.2 ลักษณะของกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากซอฟต์แวร์โปรแกรม Mustig

ผลที่ได้จากอุปกรณ์ในการวัดเป็นของบริษัท Alpes Intruments® (Meylan, 38) สำหรับซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลและเก็บข้อมูลคือ Mustig ของ Gresilog® โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะมีความสามารถในการวัดทั้งกระแสและศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานได้ภายในระยะเวลาเดียวกัน รวมทั้งความสามารถในตรวจวัดการเกิดการกัดกร่อนในช่วงเริ่มต้น และการกัดกร่อนแบบต่อเนื่อง จากดังแสดงในภาพที่ 3-9 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณของกระแสและศักย์ไฟฟ้าโดยลักษณะของสัญญาณยังสามารถนำมาวิเคราะห์และทำนายการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นได้



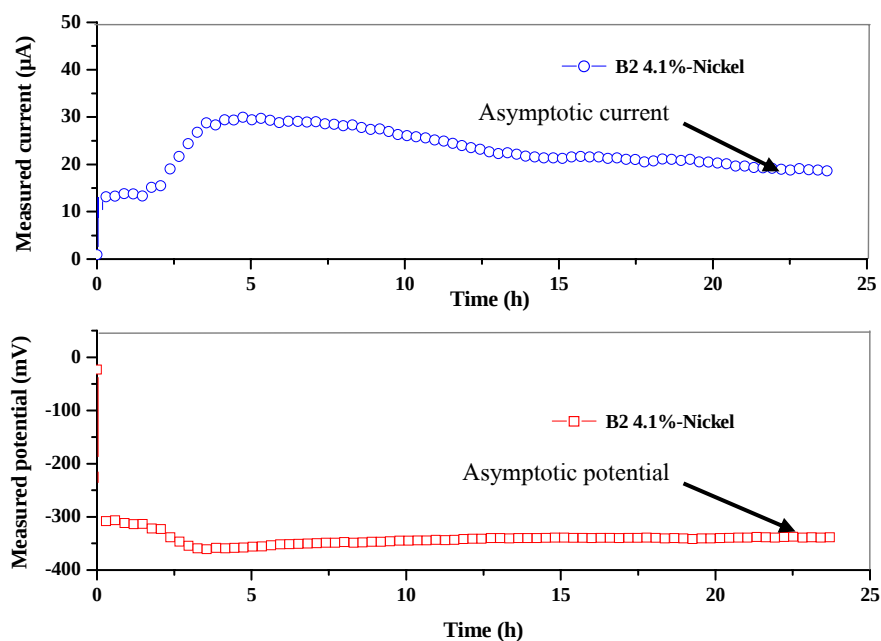
ภาพที่ 3-9 แสดงลักษณะของสัญญาณของกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่ได้ หลังจากทำการทดลองเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ของเหล็กกล้าไร้สนิม B2

บทที่ 4

ผลการทดลองด้านผลกระทบของธาตุเจือ

4.1 บทนำ

การจำลองสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวในสารละลายโดยขึ้นงานจะถูกนำมาทำการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในสภาวะที่เป็นกลางและจะควบคุมอุณหภูมิการทดลองไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส โดยวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนในสภาวะการกัดกร่อนอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่จะนำมาศึกษาผลกระทบของธาตุเจือ คือ ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิค (AISI 200 และ AISI 304) และเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริค (AISI 430 และ AISI 444) ผลการทดลองที่ได้โดยใช้จากซอฟต์แวร์ทำการประมวลผลและเก็บข้อมูลคือ Mustig ของบริษัท Gresilog® อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะมีความสามารถในการวัดทั้งกระแสและศักย์ไฟฟ้าคงที่ดังตัวอย่างภาพที่ 4-1

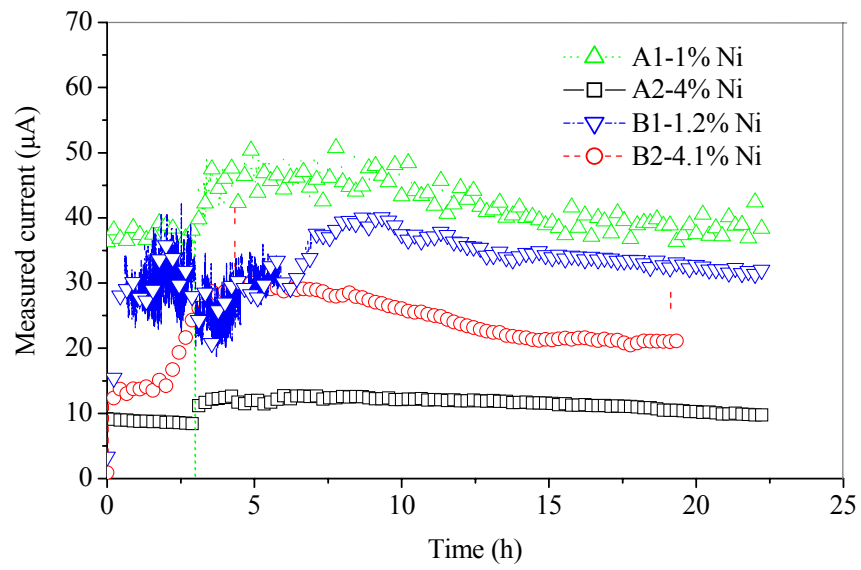


ภาพที่ 4-1 ลักษณะของกระแสและศักย์ไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีส่วนผสมของจำนวน นิกเกิล 4.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

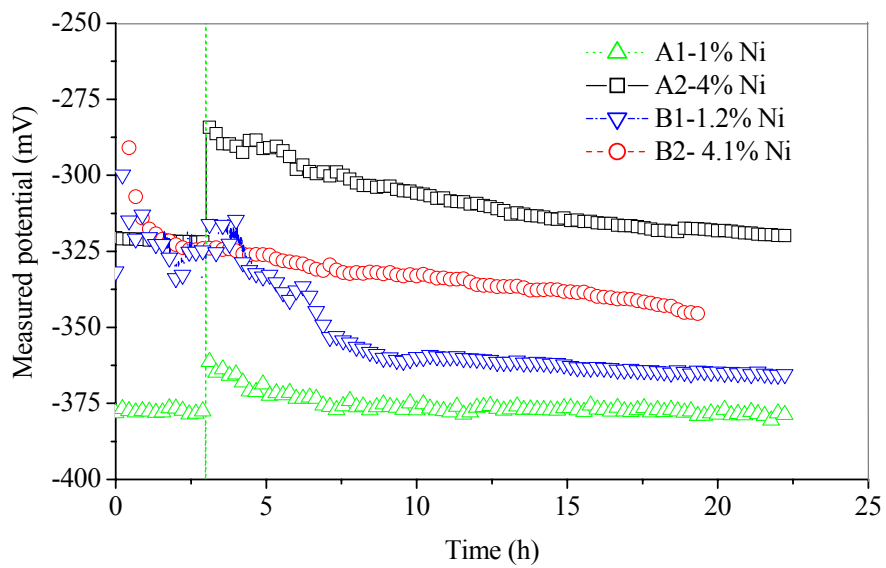
4.2 ผลการทดลองที่ได้ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 200 โดยวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากัลดกร่อน

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 200 ที่ได้นำมาทดสอบจะทำการเปรียบเทียบในแต่ละกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 200 โดยที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 200 นำมาใช้ในการทดสอบนี้มาจากบริษัทผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม 2 บริษัท ในที่นี้กำหนดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม A และ B โดยแต่ละกลุ่มจะมีส่วนผสมของนิกเกิล 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม A จะมีส่วนผสมของซัลเฟอร์ในปริมาณที่มากกว่ากลุ่ม B ซึ่งอาจจะนำไปสู่ความแตกต่างของการกัลดกร่อน สำหรับส่วนผสมทางเคมีอื่นๆ อาจถือได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันและจะไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเปรียบเทียบในแต่ละกลุ่ม การวิจัยนี้จะศึกษาการกัลดกร่อนเฉพาะในช่วงกัลดกร่อนอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง (propagation stage)

ภาพที่ 4-2 และ 4-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสการกัลดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัลดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่ม A และ B ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของส่วนผสมของนิกเกิลต่อการกัลดกร่อนภายใต้รอยร้าว ดังแสดงจากภาพที่ 4-2 แสดงให้เห็นกระแสการกัลดกร่อนของโลหะที่ปรากฏจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น และเมื่อระยะเวลาผ่านไประบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล กล่าวคือ กระแสการกัลดกร่อนจะคงที่ (asymptotic current) ในขณะเดียวกันเมื่อดูที่ศักย์ไฟฟ้าของการกัลดกร่อนดังแสดงในภาพที่ 4-3 พบว่าค่าของศักย์ไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นศักย์ไฟฟ้าก็จะคงที่ (asymptotic potential) จากการเปรียบเทียบในแต่ละกลุ่มจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ปริมาณของนิกเกิลที่มีค่าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่ากระแสการกัลดกร่อนที่วัดได้ประมาณ $42\ \mu\text{A}$ ส่วนปริมาณของนิกเกิลที่มีค่าประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่ากระแสการกัลดกร่อนที่วัดได้ประมาณ $12\ \mu\text{A}$ สำหรับศักย์ไฟฟ้าที่พบว่าในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณของนิกเกิล 4 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณของนิกเกิล 1 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4-2 ผลกระทบของปริมาณนิกเกิลต่อค่ากระแสการกัดกร่อน

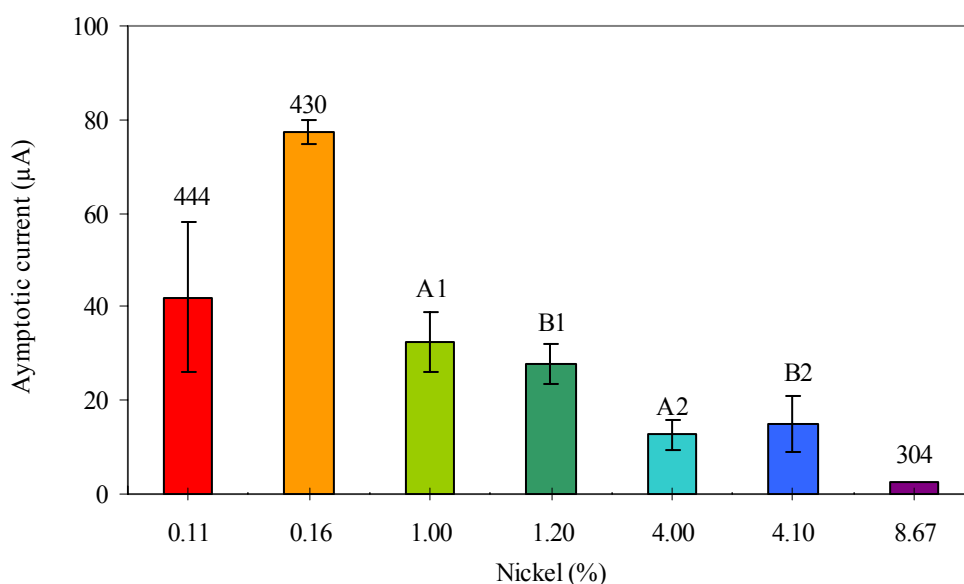


ภาพที่ 4-3 ผลกระทบของปริมาณนิกเกิลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

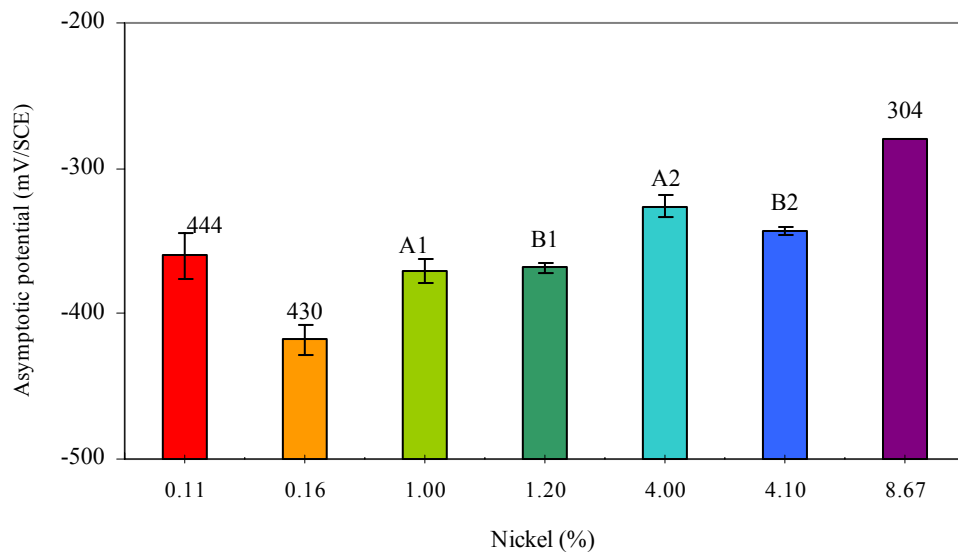
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนิติกกับและกลุ่มเฟอร์ริกโดยวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากัลดร่อน

จากผลการทดลองในภาพที่ 4-4 และ 4-5 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากระแสการกัลดร่อนจะลดลงกับปริมาณของนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นและศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นกับปริมาณของนิกเกิลที่เพิ่มขึ้น โดยผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 200 จะยังคงมีกระแสการกัลดร่อนที่สูงกว่า AISI 304 แต่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 200 จะมีค่ากระแสการกัลดร่อนที่ต่ำกว่า AISI 430 (17%Cr, 0%Mo) นอกเหนือจากนั้นยังได้ทำการเปรียบเทียบกับ AISI 444 (18%Cr, 2% Mo) จากภาพที่ 4-4 จะแสดงให้เห็นค่ากระแสการกัลดร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 444 น้อยกว่า AISI 430 เนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณโมลิบดีนัม [24]

จากการศึกษาบริเวณฟิล์มออกไซด์โดยการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้วย XPS ในเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่านิกเกิลออกไซด์นั้นมีอยู่เป็นจำนวนน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับโครเมียมออกไซด์ [9] ผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มากขึ้นจะช่วยให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานการกัลดร่อนมากยิ่งขึ้น กล่าวคือความต้านทานการกัลดร่อนก็จะสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบ AISI 444 และ AISI 430 จะแสดงให้เห็นว่า โมลิบดีนัมไม่เพียงแต่ช่วยในด้านการต้านทานการกัลดร่อนในส่วนของฟิล์มออกไซด์ แต่ยังช่วยในส่วนของเนื้อโลหะให้มีความต้านทานการกัลดร่อนมากยิ่งขึ้น [7, 24, 25]



ภาพที่ 4-4 การเปรียบเทียบค่ากระแสการกัลดร่อนที่คงที่ของเหล็กกล้าไร้สนิม

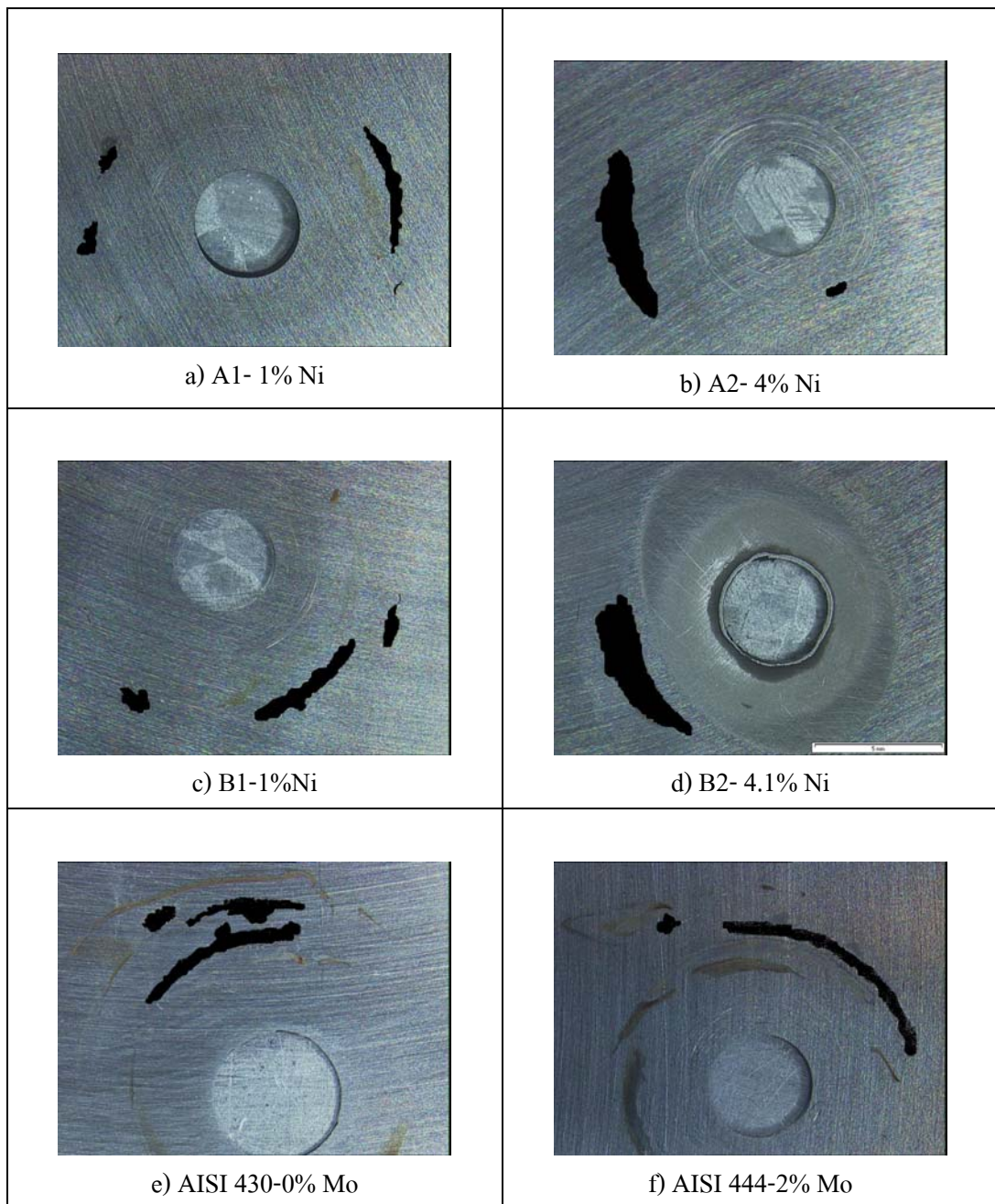


ภาพที่ 4-5 การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่คงที่ของเหล็กกล้าไร้สนิม

4.4 ลักษณะรูปร่างของพื้นที่การกัดกร่อน

4.4.1 การวัดพื้นที่การกัดกร่อน

ในการทำวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดเพื่อหาพื้นที่ผิวของการกัดกร่อนโดยกล้องจุลทรรศน์ ดังภาพที่ 4-6 หลังจากนั้นทำการคำนวณพื้นที่โดยซอฟต์แวร์ image tool ดังตารางที่ 4-1 แสดงค่าพื้นที่การกัดกร่อนจากซอฟต์แวร์ image tool จะพบว่าปริมาณของนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ได้ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การกัดกร่อนโดยตรงเมื่อสังเกตพื้นที่การกัดกร่อนเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 200 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบในปริมาณนิกเกิลที่ 1 เปอร์เซ็นต์ และ 4 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาณของนิกเกิลที่เท่ากันในเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วจะเห็นได้ว่าพื้นที่การกัดกร่อนขยายใหญ่ขึ้นกับปริมาณของซัลเฟอร์ ดังตารางที่ 4-1 และภาพที่ 4-7



หมายเหตุ : พื้นที่แรงเสียดสีดำแสดงถึงพื้นที่การกัดกร่อน

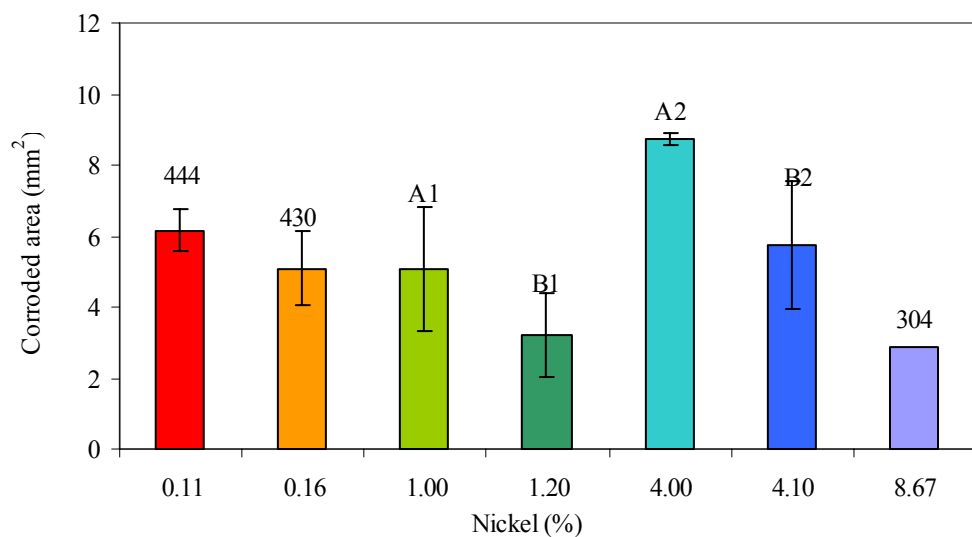
ภาพที่ 4-6 พื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์

ตารางที่ 4-1 พื้นที่การกัดกร่อนที่ได้จากการคำนวณที่ได้จากซอฟต์แวร์

ชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม	นิกเกิล ^a (% wt)	ซัลเฟอร์ ^a (ppm)	แมงกานีส ^a (% wt)	พื้นที่การกัดกร่อน ^b (mm ²)
AISI 430	0.16	15.00	0.39	18.44
AISI 444	0.11	10.00	0.39	5.57
A1	1.00	82.00	9.70	5.10
B1	1.20	2.00	9.00	3.20
A2	4.00	31.00	7.20	8.72
B2	4.10	5.00	7.10	5.74
AISI 304	8.67	10.00	1.42	2.88

^a : Souier, T. (2003)

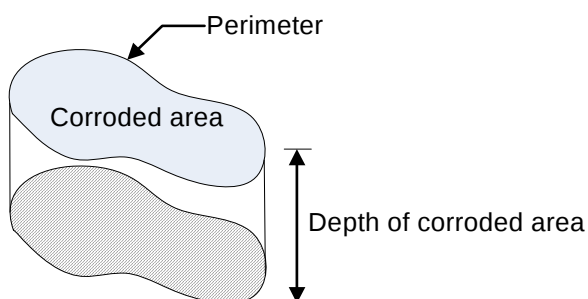
^b : จากการใช้กล้องจุลทรรศน์



ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของปริมาณของนิกเกิลกับพื้นที่การกัดกร่อนหลังจากถูกนำไปทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในสถานะที่เป็นกลาง โดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

4.4.2 การคำนวณหาค่าความลึกของการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน

ในการคำนวณหาค่าความลึกของการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน โดยใช้กฎของฟาราเดย์เพื่อคำนวณหาค่าของมวลที่สูญเสีย ดังภาพที่ 4-8 แสดงรูปแบบของมวลที่หลุดออกมาจากเนื้อโลหะอันเนื่องจากการกัดกร่อน การคำนวณหาค่าความลึกของการกัดกร่อนโดยเฉลี่ย สามารถทำได้โดยการนำเอาค่ากระแสการกัดกร่อนที่ได้จากการทดลองในระยะเวลา 24 ชั่วโมง มาทำการคำนวณหาค่าประจุ (charge) โดยซอฟต์แวร์ Origin 6.1 ซึ่งสามารถหาค่าของประจุได้จากสมการที่ 4-1 รายละเอียดการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ง-1 จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาค่ามวลของโลหะที่สูญเสีย ดังสมการที่ 4-2 จากผลการคำนวณมวลที่สูญเสียจะนำไปคำนวณหาค่าความลึกโดยเฉลี่ย ดังสมการที่ 4-3



ภาพที่ 4-8 โมเดลของการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนในลักษณะสามมิติ

โดยกำหนดให้

Q คือ ค่าประจุ (C)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ ($96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$)

N_{EQ} คือ ค่ามวลสมมูล (25.7 g)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของเหล็กกล้าไร้สนิม ($7.87 \text{ g} / \text{cm}^3$)

S_a คือ พื้นที่บริเวณที่ถูกกัดกร่อน (cm^2)

W คือ มวลที่สูญเสีย (g)

D คือ ความลึกโดยเฉลี่ยของพื้นที่การกัดกร่อน (cm)

$$Q_{\text{anodic}} = \int I_{\text{anodic}}(t) dt \quad (4-1)$$

$$W = \frac{Q_{\text{anodic}} \times N_{EQ}}{F} \quad (4-2)$$

$$D = \frac{W}{\rho \cdot S_a} \quad (4-3)$$

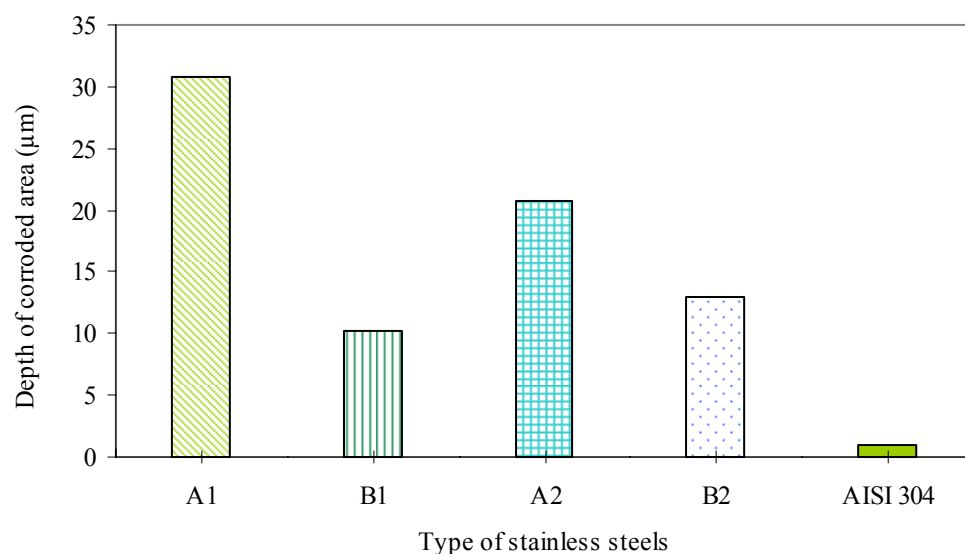
ตารางที่ 4-2 และภาพที่ 4-9 แสดงผลจากการคำนวณเพื่อหาความลึกของการกัดกร่อนโดยเฉลี่ย (average depth of corroded area) จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่ม A จะให้ค่าความลึกของการกัดกร่อนเนื้อโลหะมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่ม B ทั้งนี้เนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณของซัลเฟอร์ในเหล็กกล้าไร้สนิม

ตารางที่ 4-2 ผลที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาความลึกของการกัดกร่อน

ชนิดของ เหล็กกล้าไร้ สนิม	นิกเกิล ^a (% wt)	ซัลเฟอร์ ^a (ppm)	พื้นที่การกัด กร่อน ^b (mm ²)	ประจุ (C)	มวลที่ สูญเสีย (g)	ความลึก ของการกัด กร่อน (μm)
A1	1.00	82.00	5.09	4.64	1.24×10^{-4}	31.00
A2	4.00	31.00	3.86	2.36	0.63×10^{-4}	20.70
B1	1.20	2.00	8.72	2.64	0.70×10^{-4}	10.30
B2	4.10	5.00	5.74	2.20	0.59×10^{-4}	13.00
AISI 304	8.67	10.00	2.90	0.08	0.03×10^{-4}	1.00

^a : Souier, T. (2003)

^b : จากการใช้กล้องจุลทรรศน์



ภาพที่ 4-9 ความลึกของการกัดกร่อนโดยเฉลี่ยของในเหล็กกล้าไร้สนิม

4.5 การคำนวณอัตราการกัดกร่อนต่อพื้นที่ (current density)

การทดลองนี้จะทำการควบคุมให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะพื้นที่บริเวณใต้รอยซ้อนหรือส่วนของพลาสติกสัมผัสกับอิเล็กโทรด (confined area) จะมีพื้นที่ประมาณ 81.6 ตารางมิลลิเมตร และพื้นที่บริเวณที่ไม่สัมผัสกับพลาสติก (free area) จะมีพื้นที่ประมาณ 283 ตารางมิลลิเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรดวัดกระแส คือ 415 ตารางมิลลิเมตร จากกระแสการกัดกร่อนที่ได้จากการทดลองนำมาแทนในสมการที่ 3-6 หลังจากนั้นจึงนำมาหารด้วยพื้นที่การกัดกร่อนที่วัดได้จากการกัดกร่อนจริงดังสมการที่ 3-7 ซึ่งเรียกว่า กระแสการกัดกร่อนต่อพื้นที่ หรืออัตราการกัดกร่อน

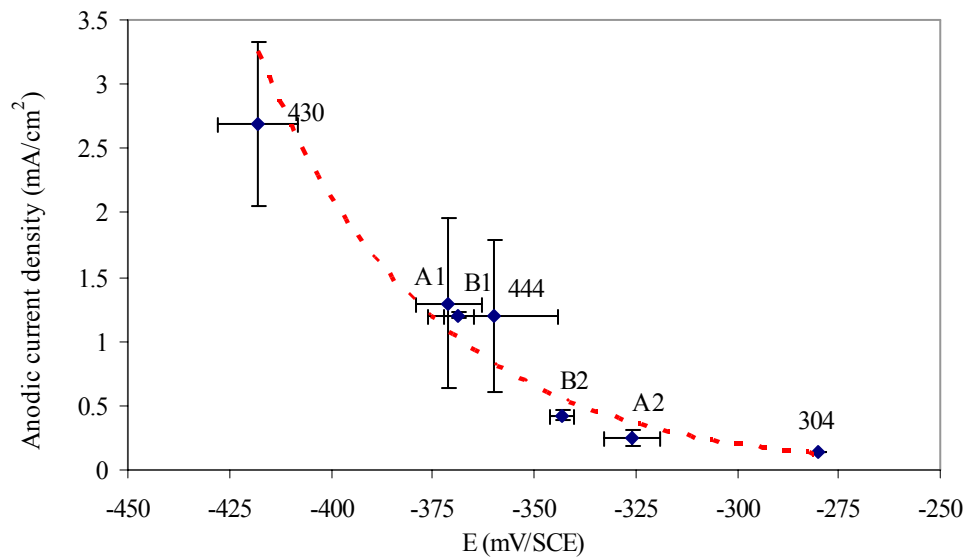
ตารางที่ 4-3 และภาพที่ 4-10 แสดงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาณของนิกเกิล เมื่อปริมาณของนิกเกิลเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสการกัดกร่อนลดลง โดยอัตราการกัดกร่อนของ AISI 430 (0.16 %Ni) มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 2.49 mA/cm^2 ในขณะที่ของ AISI 304 (8.67 %Ni) มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.15 mA/cm^2

ในการศึกษาผลกระทบของโมลิบดีนัมจะเห็นว่าอัตราการกัดกร่อนจะลดลงของ AISI 430 (0 %Mo) มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 2.5 mA/cm^2 ในขณะที่ของ AISI 444 (2 %Mo) มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 1.1 mA/cm^2 ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า AISI 444 ถึงแม้ว่าจะมีโครงสร้างแบบเฟอร์ริติก แต่ก็ยังมีค่าอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกับ A1 และ B1 อันเนื่องมาจากปริมาณของโมลิบดีนัม

ตารางที่ 4-3 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม

ชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม	นิกเกิล ^a (% wt)	โมลิบดีนัม ^a (% wt)	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (mV/SCE)	กระแสการกัดกร่อนต่อพื้นที่ (mA/cm ²)
A1	1.00	-	-371	1.30
B1	1.20	-	-365	1.23
A2	4.00	-	-326	0.24
B2	4.10	-	-343	0.43
AISI 304	8.67	0.21	-280	0.15
AISI 430	0.16	0.03	-418	2.49
AISI 444	0.11	2.07	-360	1.16

^a : Souier, T. (2003)



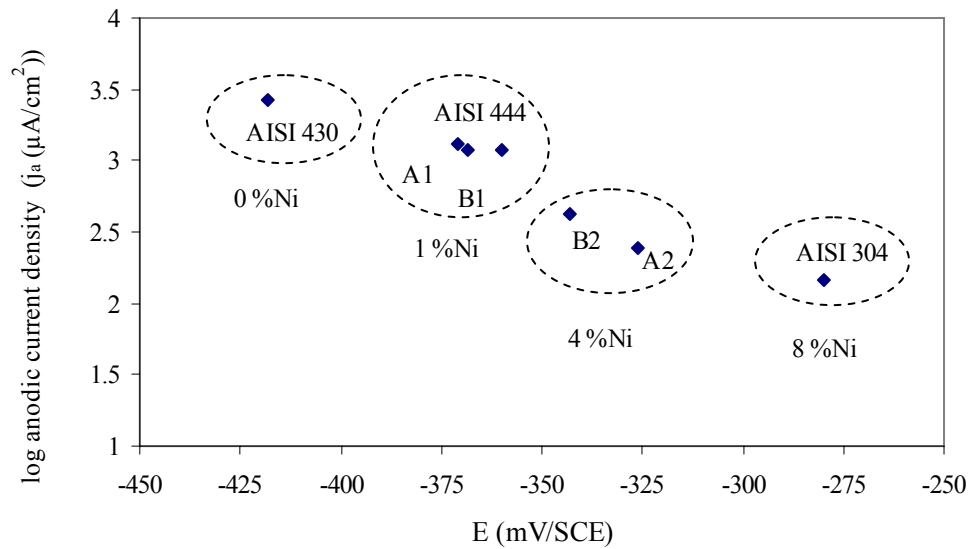
ภาพที่ 4-10 ผลกระทบของนิเกิลและ โมลิบดีนัมต่ออัตราการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม

4.6 ผลการทดลองด้านผลกระทบของธาตุเจือต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว

4.6.1 ผลกระทบของปริมาณของนิเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิม

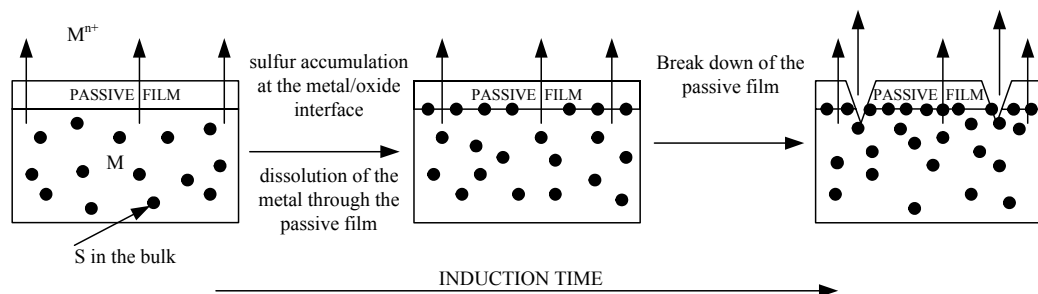
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณของนิเกิลของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นมีผลกระทบต่อการกัดกร่อน โดยนิเกิลช่วยให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานการกัดกร่อนหรือมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น ความสัมพันธ์ของปริมาณของนิเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมต่ออัตราการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวจะลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียล ดังภาพที่ 4-10 อัตราการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวจะลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียล

เมื่อนำค่าความหนาแน่นของการกัดกร่อนหรืออัตราการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวมาทำการใส่ค่าลอการิทึม (logarithm) ตามทฤษฎีของทาเฟล (Tafel law) จะนำมาซึ่งความสัมพันธ์กับปริมาณของนิเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมกับศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน การเปรียบเทียบเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีนิเกิล 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่า เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณของนิเกิล 4 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของปริมาณของนิกเกิลกับศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิม

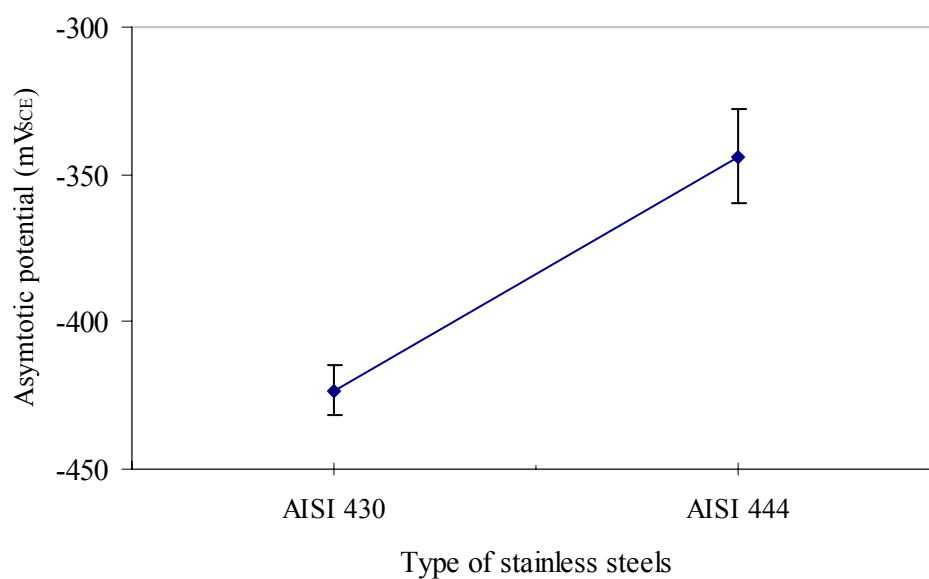
จากตารางที่ 4-2 แสดงให้เห็นพื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวไม่ได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณของนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยตรง กล่าวคือปริมาณของนิกเกิลเพิ่มขึ้นแต่พื้นที่การกัดกร่อนไม่ได้มีขนาดเล็กลง แต่เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่การกัดกร่อนระหว่างกลุ่ม A กับกลุ่ม B พื้นที่การกัดกร่อนของกลุ่ม A จะมีพื้นที่การกัดกร่อนที่มากกว่ากลุ่ม B เนื่องจากพื้นที่การกัดกร่อนขยายเพิ่มขึ้นกับปริมาณซัลเฟอร์ ในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 200 จะมีส่วนผสมของแมงกานีสอยู่เป็นจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับ AISI 304 โดยทั่วไปนั้นซัลเฟอร์มีความสามารถในการรวมกับแมงกานีสบริเวณพื้นผิวโลหะซึ่งจะนำไปสู่การกัดกร่อน [26] ดังกลไกของฟิล์มพาสซีฟเกิดความเสียหายเนื่องจากอิทธิพลของซัลเฟอร์ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกัดกร่อนบริเวณพื้นผิวของโลหะ ดังภาพที่ 4-12 พื้นที่การกัดกร่อนขยายเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณของนิกเกิลที่ใกล้เคียงกัน คือ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม A จะมีพื้นที่การกัดกร่อนมีขนาดใหญ่กว่า เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม B



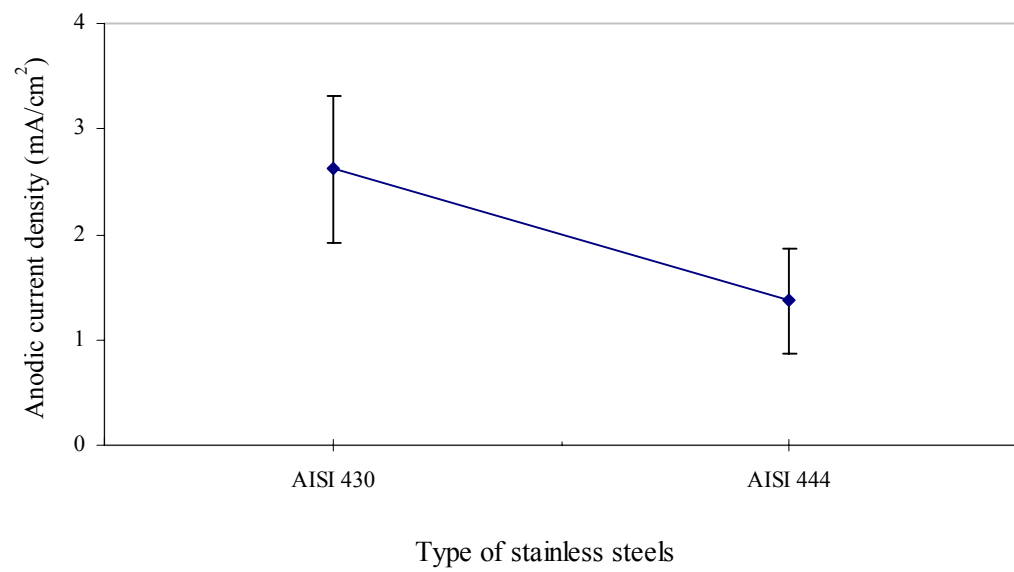
ภาพที่ 4-12 กลไกของฟิล์มออกไซด์เกิดความเสียหายเนื่องจากอิทธิพลของซัลเฟอร์ที่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวของโลหะ [26]

4.6.2 ผลกระทบของปริมาณของโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิม

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-13 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของโมลิบดีนัมของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นมีผลกระทบต่อการกัดกร่อน เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณของโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมที่มากขึ้นจะช่วยทำให้โลหะมีความเสถียรหรือมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นจากการทดลองค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้ของ AISI 430 (0 %Mo) เหลือ -420 mV ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าของ AISI 444 (2 %Mo) คือ -350 mV เมื่อทำการเปรียบเทียบเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโมลิบดีนัม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยกว่า เหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่มีส่วนผสมของโมลิบดีนัม ในขณะเดียวกัน ดังภาพที่ 4-14 แสดงให้เห็นอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมของโมลิบดีนัม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่ากระแสการกัดกร่อนต่อพื้นที่หรืออัตราการกัดกร่อนที่น้อยกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่มีส่วนผสมของโมลิบดีนัม



ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ของปริมาณของโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อศักย์ไฟฟ้า



ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของปริมาณของโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่ออัตราการกัดกร่อน

บทที่ 5

ผลการทดลองด้านผลกระทบของการแปรรูปเย็น

5.1 บทนำ

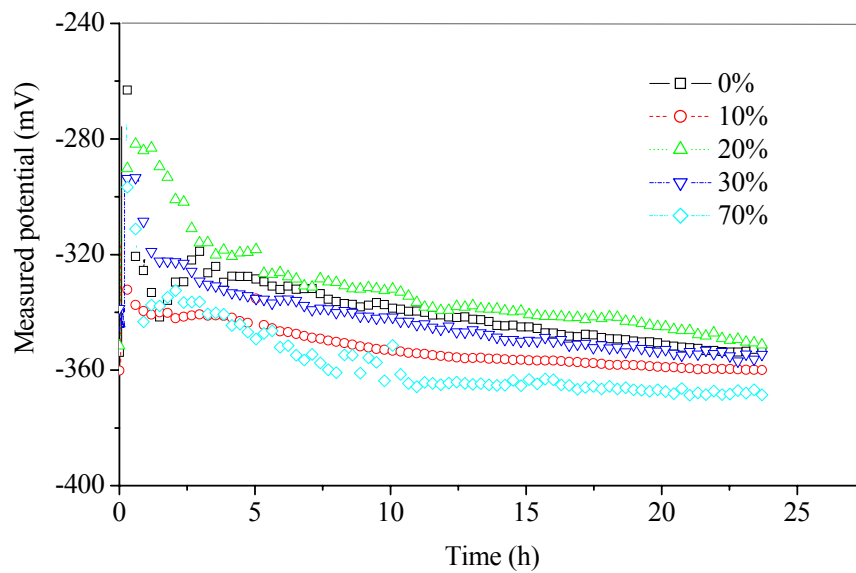
จากการจำลองสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวในสารละลายโดยชิ้นงานจะถูกนำมาทำทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 โมลาร์ และค่าพีเอช 6.6 และควบคุมอุณหภูมิการทดลองไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมงโดยวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ในสภาวะการกัดกร่อนอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่จะนำมาศึกษาผลกระทบของการแปรรูปเย็น คือ ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีนิคเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อย (Low Ni) โดยเหล็กกล้าไร้สนิมดังกล่าวจะผ่านการรีดเย็น (deformation) ที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองที่ได้โดยใช้จากซอฟต์แวร์ทำการประมวลผลและเก็บข้อมูลคือ Mustig ของบริษัท Gresilog® อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะมีความสามารถในการวัดทั้งกระแสและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

5.2 ผลกระทบของการรีดเย็นต่อค่ากระแสการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

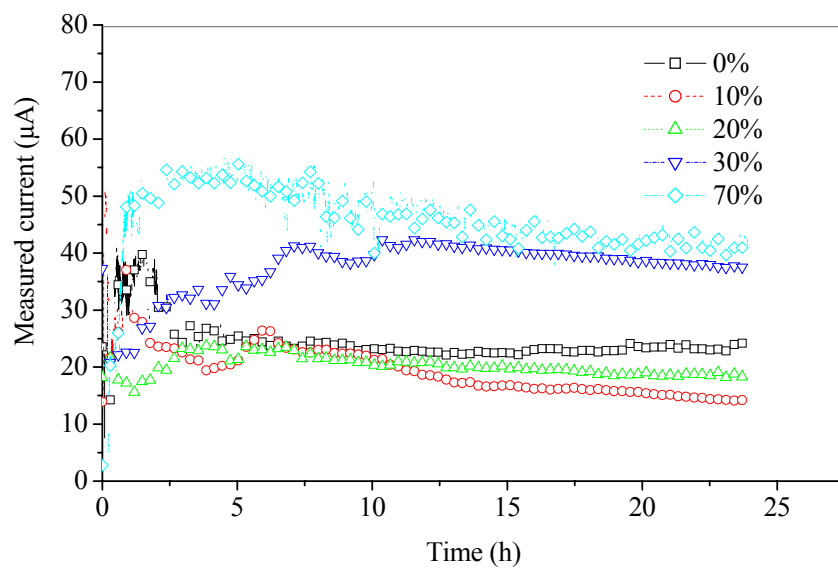
ตารางที่ 5-1 และภาพที่ 5-1 ค่ากระแสการกัดกร่อนที่เกิดจากผลกระทบของการรีดเย็นตั้งแต่ 0, 10, 20, และ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าของกระแสการกัดกร่อนโดยประมาณประมาณ 15-25 μA และเมื่อทำการรีดเย็นที่ 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์การรีด ค่าของกระแสการกัดกร่อนจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 40 μA ภาพที่ 5-2 แสดงความสัมพันธ์ของผลกระทบของการรีดเย็นต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยจะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ถึงแม้จะทำการรีดเย็นที่ 70 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5-1 ค่ากระแสการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น	กระแสการกัดกร่อน (μA)	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (mV/SCE)
0	25	-345
10	15	-355
20	20	-340
30	39	-352
70	42	-370



ภาพที่ 5-1 ผลกระทบของการแปรรูปเงินเคลือบกล้าไร้สนิมที่ได้ผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ต่อกระแสการกัดกร่อน

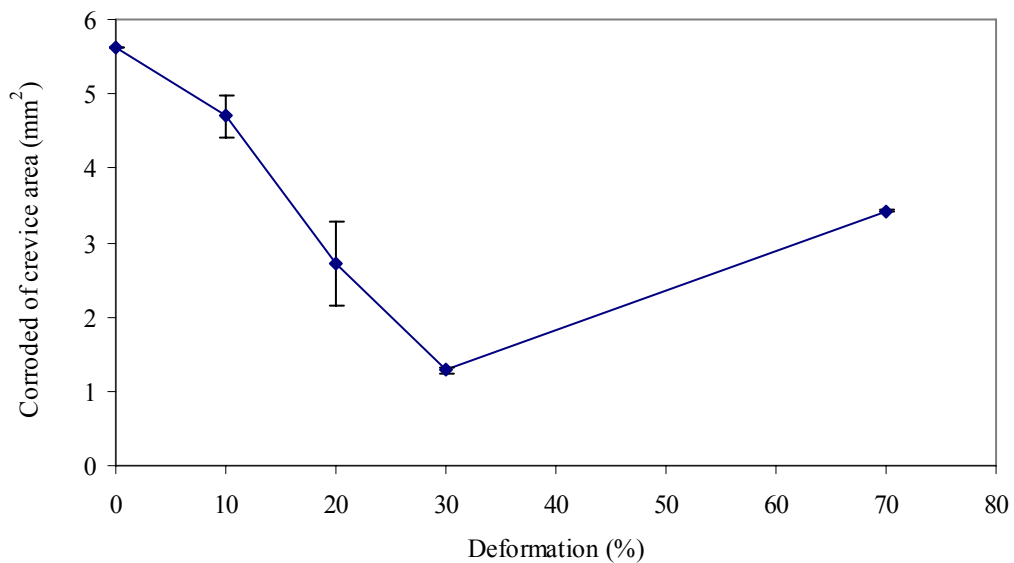


ภาพที่ 5-2 ผลกระทบของการแปรรูปเงินเคลือบกล้าไร้สนิมที่ได้ผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

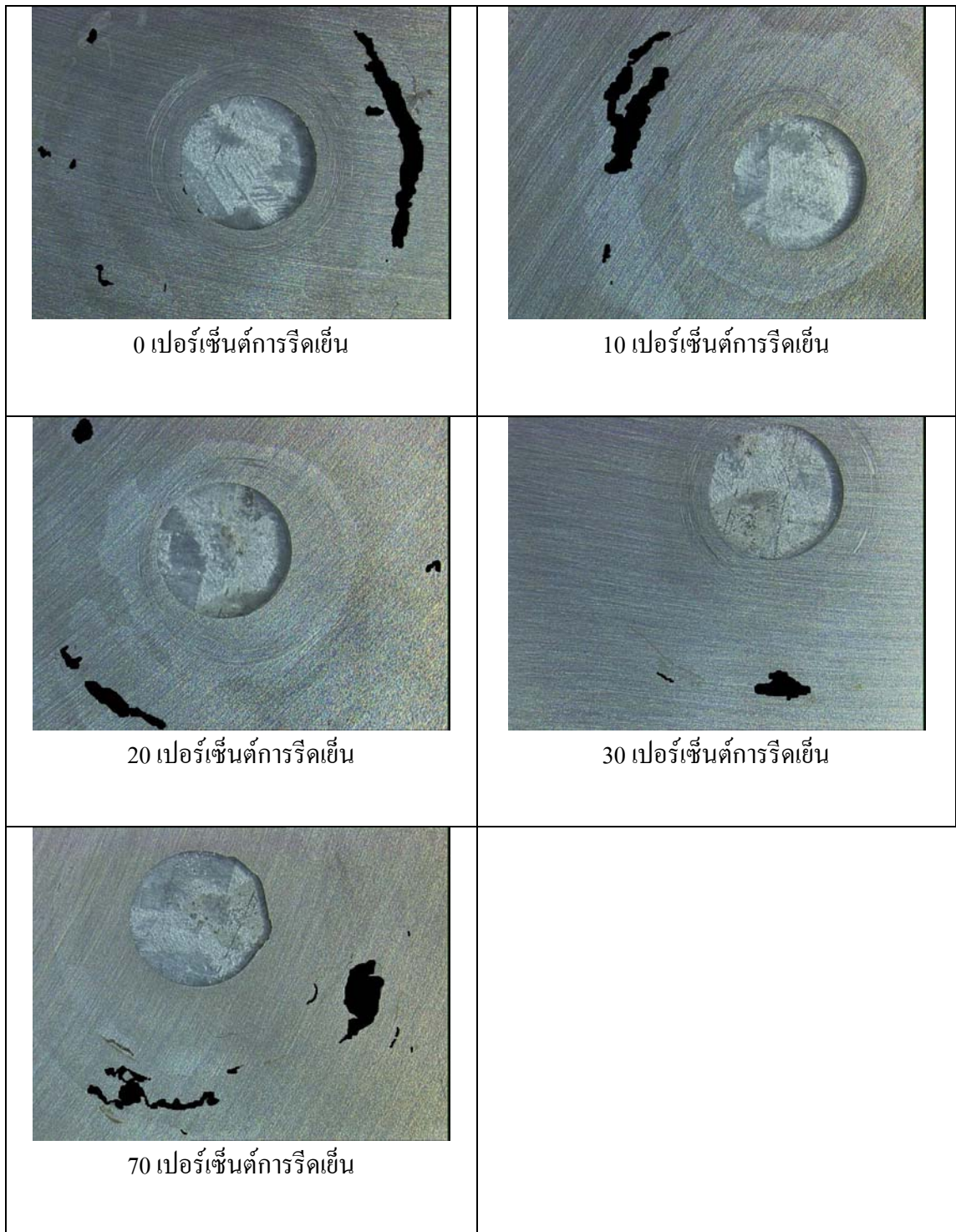
5.3 ลักษณะรูปร่างของพื้นที่การกัดกร่อน

5.3.1 การวัดพื้นที่การกัดกร่อน

ในการทำวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดเพื่อหาพื้นที่ผิวของการกัดกร่อนโดยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 5-4 หลังจากนั้นทำการคำนวณพื้นที่โดยซอฟต์แวร์ image tool ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการรีดเย็นต่อการกัดกร่อนดังภาพที่ 5-3 จากการทดลองภายใต้สภาวะการจำลองการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวจากผลกระทบของการแปรรูปเย็นแสดงให้เห็นว่า ผลกระทบดังกล่าวไม่ได้ส่งผลกระทบโดยตรงจากการรีดเย็น เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่การกัดกร่อนผลปรากฏว่าพื้นที่การกัดกร่อนมีแนวโน้มขนาดเล็กลง ที่อัตราการรีดที่ 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ แต่หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการรีดเย็นที่ 70 เปอร์เซ็นต์การรีด พื้นที่การกัดกร่อนมีการขยายเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัตราการรีดที่ 30 เปอร์เซ็นต์การรีด



ภาพที่ 5-3 ความสัมพันธ์ของพื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยร้าวกับการแปรรูปเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิม



หมายเหตุ : พื้นที่แรงเสียดสีดำแสดงถึงพื้นที่การกัดกร่อน

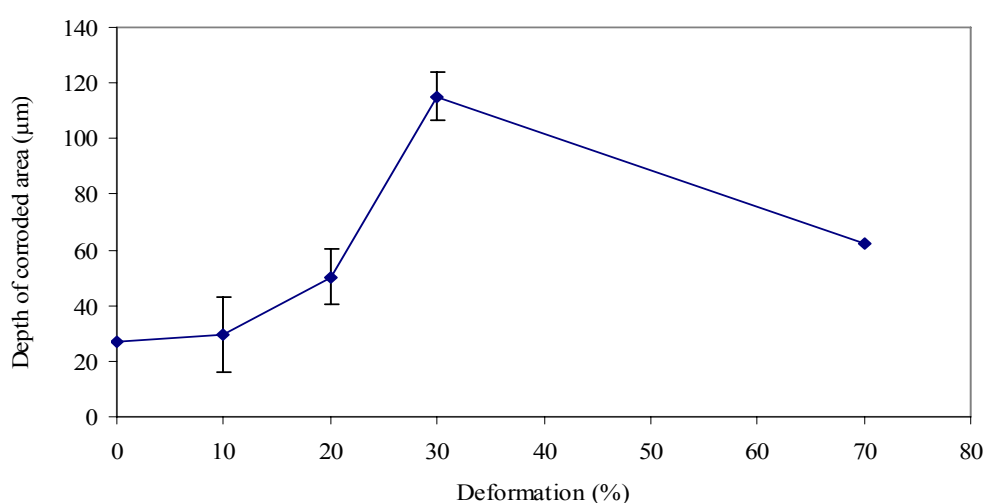
ภาพที่ 5-4 แสดงพื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

5.3.2 การคำนวณหาค่าความลึกของการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน

การคำนวณหาค่าความลึกของการกัดกร่อนโดยใช้กฎของฟาราเดย์ เพื่อคำนวณหาค่าของมวลที่สูญเสียโดยใช้วิธีการคำนวณค่าความลึกของการกัดกร่อนโดยเฉลี่ยได้ ดังหัวข้อ 4.4.2 สำหรับผลที่ได้จากการคำนวณความลึกโดยเฉลี่ยได้แสดงใน ตารางที่ 5-2 และในภาพที่ 5-5 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอัตราการกัดที่ 30 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิดความลึกของการกัดกร่อนจะมากกว่าอัตราการกัดที่ 0, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอัตราการกัดขึ้นที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ความลึกของการกัดกร่อนกลับลดลงเมื่อเทียบกับ 30 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5-2 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาความลึกของการกัดกร่อน

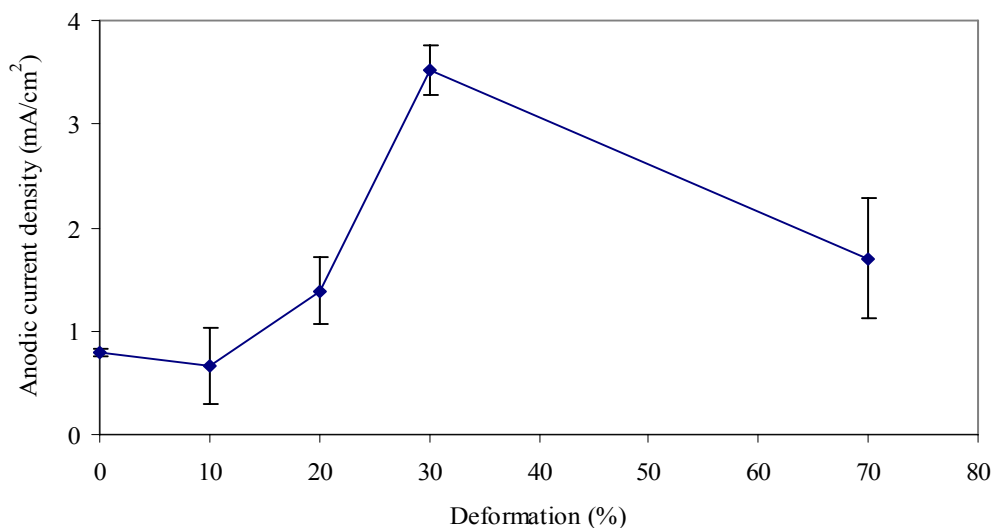
เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น	พื้นที่การกัดกร่อน (mm ²)	ความยาวรอบพื้นที่การกัดกร่อน (mm)	ประจุ (C)	มวลสูญเสีย (g)	ความลึกการกัดกร่อน (μm)	พื้นที่การกัดกร่อนจริง (mm ²)
0	5.62	26.63	3.81	1.20×10^{-3}	27.18	6.34
10	4.70	22.77	3.49	1.00×10^{-3}	29.40	5.34
20	2.73	15.12	3.54	1.00×10^{-3}	50.24	3.48
30	1.29	9.85	4.00	1.20×10^{-3}	115.26	2.39
70	3.43	19.81	4.90	1.40×10^{-3}	62.29	4.50



ภาพที่ 5-5 ความลึกโดยเฉลี่ยของพื้นที่การกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อน ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์

5.4 การคำนวณอัตราการกัดกร่อนต่อพื้นที่ (current density)

จากตัวอย่างการคำนวณหากระแสการกัดกร่อนต่อพื้นที่หรืออัตราการกัดกร่อนโดยเฉลี่ยดังกล่าวข้อ 4.5 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนต่อการรีดเย็นได้ดังภาพที่ 5-6 โดยพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการรีดเย็นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ ถึงการรีด 70 เปอร์เซ็นต์การรีด ค่าอัตราการกัดกร่อนของ 0 และ 10 เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น คือ 10 mA/cm^2 และค่าอัตราการกัดกร่อนจะมีค่าสูงสุดที่ 30 เปอร์เซ็นต์การรีด คือ 35 mA/cm^2 และอัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการรีดของ 70 เปอร์เซ็นต์การรีด คือ 20 mA/cm^2

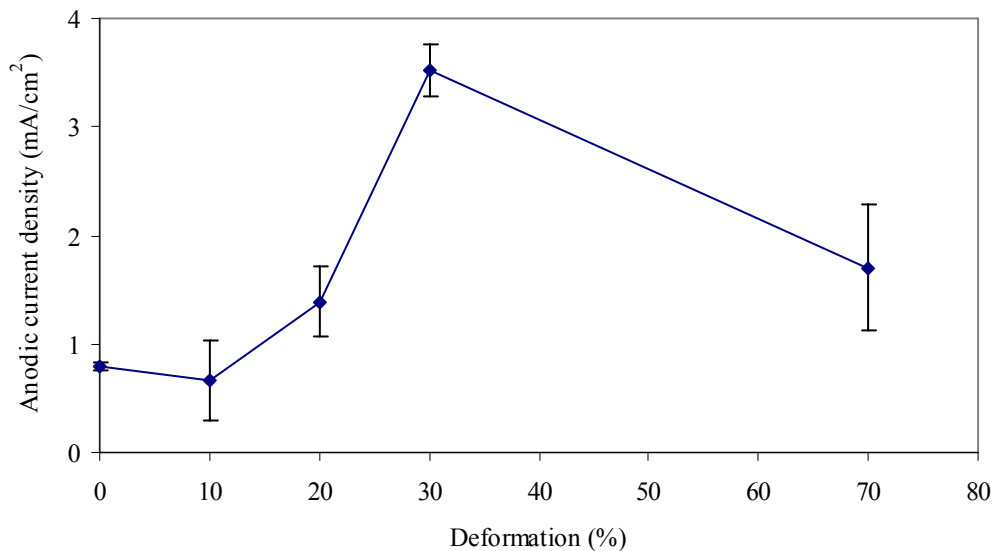


ภาพที่ 5-6 ความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์

5.5 ผลการทดลองด้านผลกระทบของการแปรรูปเย็นต่อการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว

ผลกระทบของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อย (Low Ni) โดยทดสอบในสถานะจำลองการกัดกร่อนภายใต้รอยร้าว จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และค่าพีเอช 6.6 ควบคุมอุณหภูมิการทดลองไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส โดยวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน ในสถานะการกัดกร่อนอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่จะนำมาศึกษาผลกระทบของการแปรรูปเย็นจะผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นกับอัตราการรีดกล่าวคือ 0 เปอร์เซ็นต์ จะมีอัตราการกัดกร่อนคือ $0.8 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการรีดที่ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีอัตรา

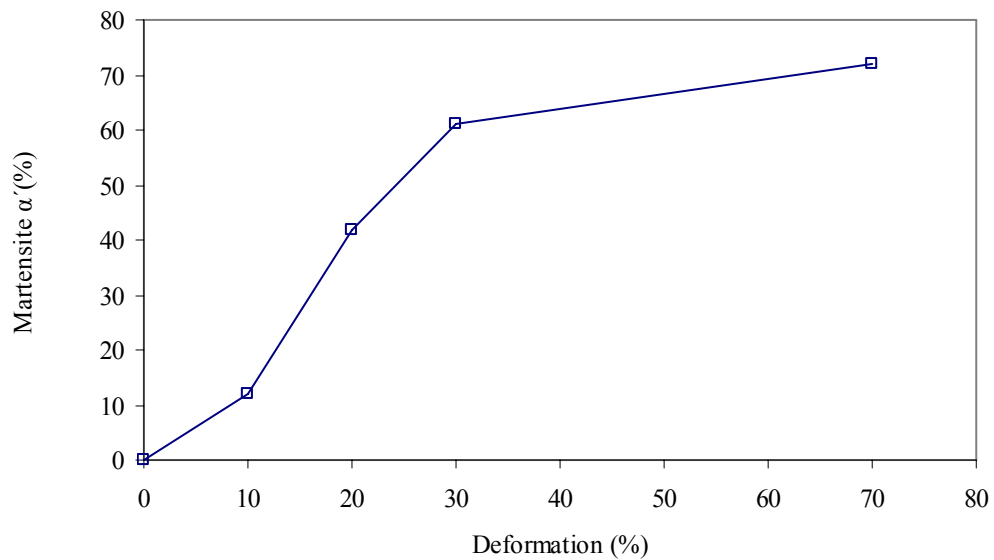
การกัดกร่อนที่สูงขึ้นคือ $3.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการรีดที่ 70 เปอร์เซ็นต์ จะมีอัตราการกัดกร่อนจะลดลงเหลือ $1.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ดังภาพที่ 5-7



ภาพที่ 5-7 ความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อผ่านการรีดเย็นที่ 0, 10, 20, 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์

เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อย (Low Ni) เมื่อทำการเพิ่มอัตราการรีด ซึ่งผลก็คือทำให้ โครงสร้างแบบออสติเนติก เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซด์ แบบ non-ferromagnetic (ϵ) และแบบ ferromagnetic center cubic (α') [22] จากผลกระทบของการแปรรูปเย็น แสดงให้เห็นว่า อัตราการกัดกร่อนไม่ได้เพิ่มขึ้นกับโครงสร้างของมาร์เทนไซด์ที่เพิ่มขึ้นโดยตรง เนื่องจากการรีดเย็น นอกเหนือจากนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมดังกล่าวยังได้มีการทดสอบความสัมพันธ์ ความแข็งแบบวิกเกอร์ (vicker hardness) และมาร์เทนไซด์ ซึ่งได้เพิ่มขึ้นกับอัตราการรีดเย็น [13] ดังแสดงในภาพที่ 5-8

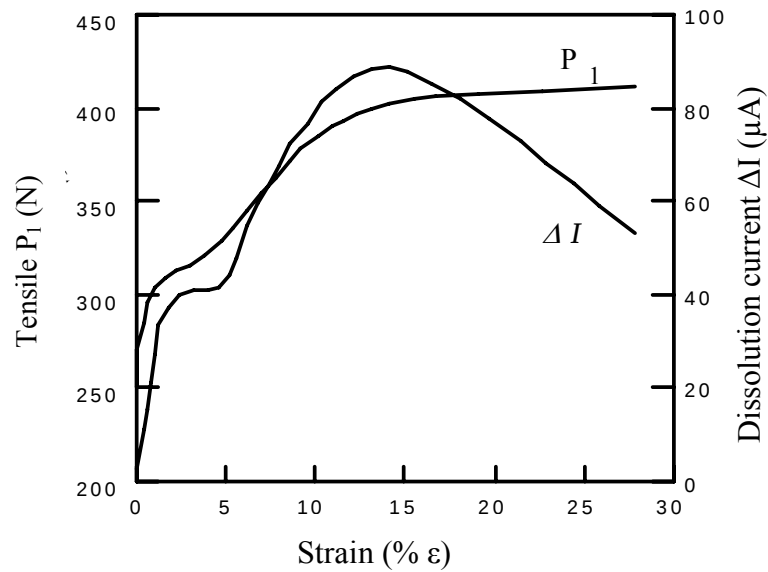
จากการศึกษาความสัมพันธ์ของมาร์เทนไซด์ในโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 301 กับการกัดกร่อน ได้แสดงให้เห็นว่า กระแสของการกัดกร่อนที่พาสซีว (current passivity) ไม่ได้เพิ่มขึ้นโดยตรงกับจำนวนมาร์เทนไซด์ในเหล็กกล้าไร้สนิม แต่จากการนำชิ้นงานแช่ในสารละลาย คลอไรด์ผลที่ได้แสดงให้เห็นการกัดกร่อนตามขอบเกรน (intergranular corrosion) เป็นปรากฏการณ์หลักที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความลึกที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นกับการ เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น [16]



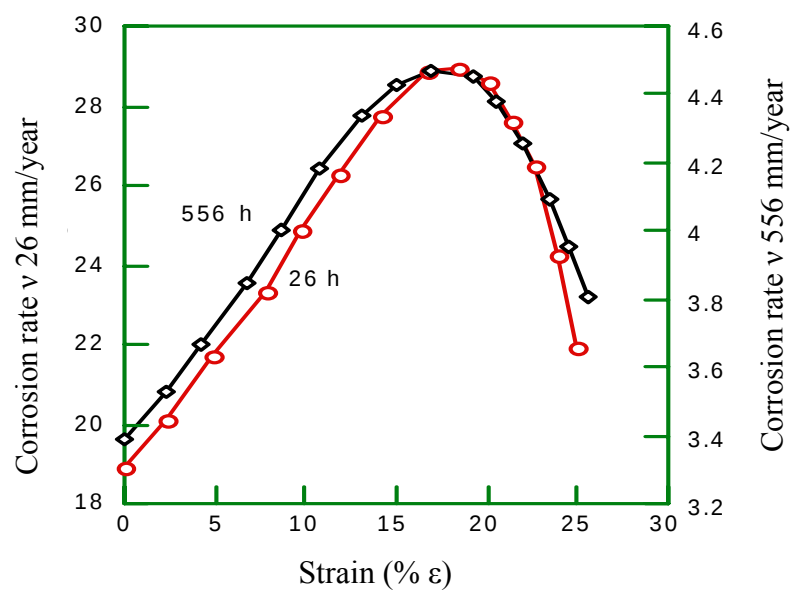
ภาพที่ 5-8 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนมาร์เทนไซต์ซึ่งได้เพิ่มขึ้นกับอัตราการรีด [13]

การเพิ่มอัตราการรีดที่เกินช่วงการแตกหักหรือความเค้นจุดคราก (yield strength) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (plastic deformation) ซึ่งจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมและนำไปสู่การขยายขนาดของผลึก ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้เกิดความบกพร่องเกิดขึ้นในโครงสร้าง ผลกระทบดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของการกัดกร่อนในโลหะ

หลังจากการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างอย่างถาวรและไม่มีแรงกระทำจากภายนอกหลงเหลืออยู่ก็ตาม แต่ในโครงสร้างของโลหะยังคงมีความเค้นอยู่ภายในระดับจุลภาคของโครงสร้าง (micro-structure) ซึ่งมีอยู่บริเวณที่เกิดความบกพร่องของโครงสร้าง เรียกว่าความเค้นตกค้าง (residual stress) ความเค้นที่ตกค้างอยู่บริเวณดิสโลเคชันในโลหะจะนำไปสู่อัตราการกัดกร่อนที่สูงขึ้นในช่วงที่เกิดการกองทับกันของดิสโลเคชัน หลังจากนั้นอัตราการกัดกร่อนจะลดลงในช่วงไดนามิกรีโคปเวอรี่เนื่องจากความเค้นที่ตกค้างอยู่บริเวณดิสโลเคชันลดลงดังได้แสดงในภาพที่ 5-9 การเพิ่มความเครียด (strain) ให้กับเหล็ก Armco-iron ในสารละลายกรดซัลฟิวริกแอซิด (H_2SO_4) พบว่ากระแสการกัดกร่อนสูงที่ 12-15 เปอร์เซ็นต์ความเครียด หรือบริเวณที่เกิดการกองทับกันของดิสโลเคชัน และกระแสการกัดกร่อนจะลดลงในช่วงไดนามิกรีโคปเวอรี่ นอกเหนือจากนั้นยังได้มีการทดสอบการกัดกร่อนโดยการนำเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านความเค้นดึงไปแช่ในสารละลาย 30% HCl ในระยะเวลาที่แตกต่างกันคือที่ 26 ชั่วโมง และ 556 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่าอัตราการกัดกร่อนต่อปีในแต่ละความเครียดมีค่าใกล้เคียงกัน และอัตราการกัดกร่อนมีค่ามากที่สุดที่บริเวณที่เกิดการกองทับกันของดิสโลเคชัน และอัตราการกัดกร่อนจะลดลงช่วงไดนามิกรีโคปเวอรี่ ภาพที่ 5-10



ภาพที่ 5-9 ความสัมพันธ์ของความเค้นดึงของแมกนีเซียมอัลลอยที่มีผลต่อกระแสการกัดกร่อน [14]



ภาพที่ 5-10 ความสัมพันธ์ของความเค้นดึงและอัตราการกัดกร่อนต่อปีของเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นระยะเวลา 26 ชั่วโมง และ 556 ชั่วโมง ในสารละลาย 30% HCl [14]

การศึกษาถึงผลกระทบของการแปรรูปขึ้นที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยพบว่า จะเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณโดยรอบของสารฝังใน ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีการกองทับกันของดิสโลเคชันที่ 20 เปอร์เซ็นต์ บริเวณดังกล่าวนี้ยังเกิดจำนวนของพื้นที่การกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่นๆ ผลการทดลอง

ดังกล่าวได้แสดงให้เห็นความชัดเจนของการกักกร่อนได้ชัดเจนเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของการกักกร่อน [13]

ดังนั้นสำหรับการวิจัยเรื่องผลกระทบของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อยต่อการกักกร่อนภายใต้รอยร้าวในสถานะที่จำลองในข้างต้น แสดงให้เห็นว่าอัตราการกักกร่อนจะเพิ่มขึ้นกับอัตราการรีดในช่วง 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราการรีดที่ 70 เปอร์เซ็นต์ อัตราการกักกร่อนค่อนข้างคงที่และลดลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการกักกร่อนไม่ได้เพิ่มขึ้นโดยตรงกับจำนวนการเกิดของมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ดูเหมือนเป็นผลกระทบโดยตรงกับการดิสโลเคชัน ซึ่งกระทำเป็นตัวเร่งให้เกิดการกักกร่อนภายใต้รอยร้าวทำให้อัตราการกักกร่อนสูงขึ้น โดยอัตราการรีดที่ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าของอัตราการกักกร่อนและความลึกของพื้นที่การกักกร่อนที่แสดงอย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากเป็นบริเวณที่เกิดการกองทับกันจำนวนของดิสโลเคชัน

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

6.1 ผลกระทบของธาตุเจือต่อการกักกร่อนภายใต้รอยซ้อน

จากผลการทดลองผลกระทบของธาตุเจือต่อการกักกร่อนภายใต้รอยซ้อนในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยจะให้ความสำคัญกับผลกระทบของนิกเกิลและโมลิบดีนัม โดยทำการทดสอบโดยวิธีการวัดแบบศักย์ไฟฟ้ากักกร่อน ชิ้นงานจะถูกนำมาทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 โมลาร์ และค่าพีเอช 6.6 โดยควบคุมอุณหภูมิการทดลองไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง การทดสอบโดยเครื่องมือชนิดนี้จะมีประโยชน์ต่อการแบ่งแยกสภาวะการกักกร่อนได้อย่างชัดเจน คือ สภาวะเมื่อเริ่มการเกิดการกักกร่อน (initiation stage) และสภาวะหลังจากฟิล์มออกไซด์ที่ผิวเริ่มถูกทำลายจะเกิดการกักกร่อนอย่างรุนแรง (propagation stage) สำหรับการศึกษาจะทำการศึกษาเฉพาะในช่วงสภาวะหลังจากฟิล์มออกไซด์ที่ผิวเริ่มถูกทำลายและเกิดการกักกร่อนอย่างรุนแรงอันเป็นสภาวะที่จะบ่งชี้ถึงการกักกร่อนภายใต้รอยซ้อน ผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

6.1.1 การเพิ่มปริมาณนิกเกิลจาก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเหล็กกล้าไร้สนิมจะสามารถลดอัตราการกักกร่อนได้ประมาณ 3 เท่า

6.1.2 การเพิ่มปริมาณนิกเกิลและโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกักกร่อนสูงขึ้น กล่าวคือเหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานการกักกร่อนสูงขึ้น

6.1.3 นิกเกิลไม่ได้ส่งผลกระทบโดยตรงกับพื้นที่การกักกร่อนบริเวณภายในของรอยซ้อน แต่ดูเหมือนจะเป็นผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของซัลเฟอร์ในเหล็กกล้าไร้สนิม

6.2 ผลกระทบของการแปรรูปเย็นต่อการกักกร่อนภายใต้รอยซ้อน

ผลการทดลองผลกระทบการแปรรูปเย็นต่อการกักกร่อนภายใต้รอยซ้อนในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อย (Low Ni) โดยการแปรรูปเย็นจะผ่านการรีดเย็นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษาผลกระทบดังกล่าวจะใช้วิธีการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองผลกระทบของธาตุเจือต่อการกักกร่อนภายใต้รอยซ้อนในเหล็กกล้าไร้สนิม และทำการศึกษาเฉพาะในช่วงสภาวะหลังจากฟิล์มออกไซด์ที่ผิวเริ่มถูกทำลายจะเกิดการกักกร่อนอย่างรุนแรง ผลการทดลองพบว่า

6.2.1 อัตราการกัดกร่อนแบบภายใต้รอยซ้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมจะเพิ่มขึ้นกับอัตราการรีดในช่วงแรกคือที่ 0 เปอร์เซ็นต์ ถึงอัตราการรีดที่ 30 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราการรีดถึงอัตราการรีดที่ 70 เปอร์เซ็นต์ กลับทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

6.2.2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการกัดกร่อนแบบภายใต้รอยซ้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ได้เพิ่มขึ้นกับจำนวนการเกิดมาร์เทนไซด์ในโครงสร้างที่เกิดจากการรีดเย็น แต่ดูเหมือนเป็นผลกระทบโดยตรงกับการดิสโลเคชัน กล่าวคือ การดิสโลเคชันกระทำเหมือนเป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนภายใต้รอยซ้อนเพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการรีดที่ 30 เปอร์เซ็นต์ เป็นบริเวณที่พื้นที่การกัดกร่อนมีความลึกมากกว่าอัตราการรีดอื่นๆ โดยที่อัตราการรีดที่ 30 เปอร์เซ็นต์ เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นหรือการกองทับกันของการดิสโลเคชัน ซึ่งใกล้เคียงกันกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่เกิดการกองทับกันของการดิสโลเคชันที่ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยบริเวณที่เกิดความบกพร่องของโครงสร้างหรือการดิสโลเคชันจะเกิดความเค้นตกค้างอยู่โดยรอบของโครงสร้าง และนำไปสู่การกัด-กร่อนที่รวดเร็วกว่าโครงสร้างปกติ

6.2.3 ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อัตราการรีดเย็นที่ 20-30 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดพื้นที่การกัดกร่อนเล็กกว่าเมื่อเทียบกับอัตราการรีดเย็นที่ 70 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการคำนวณหาความลึกของพื้นที่การกัดกร่อน ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการรีดเย็นที่ 30 เปอร์เซ็นต์ มีความลึกมากที่สุด ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการกองทับกันของการดิสโลเคชัน และอัตราการรีดเย็นที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ความลึกของพื้นที่การกัดกร่อนกลับลดลง ซึ่งเป็นช่วงของการเกิดไดนามิกรีโคปเวอรี

เอกสารอ้างอิง

1. Oldfield, J. W. and Sutton, W. H. Br. Corro. J. 13(1978) , 13-22.
2. Baroux, B. et al. Stainless steels. Chapter 5, c1993.
3. Baroux, B. et al. Stainless steels. Chapter 9, c1993.
4. Sato, N. Corrosion science. 37 (1995) , 1947-1967.
5. Souier, T. DEA report, INPG. (2003).
6. Lacombe, P. and Bèrager, G. Stainless steels. Chapter 2, c1993.
7. Masao, Sakashita. and Norio Sato. Corrosion Science. 17 (1977) , 473-486.
8. Brossia, C.S.and Kelly, R.G. Corrosion science. 40 (1998) , 1851-1871.
9. Marcus, P. and Olefjord, J. Corrosion mechanisms in theory and practice. 175, c1995.
10. Hazza, M. I. and El-Dahshan, M. E . Corrosion Science. 95 (1994) , 199-209.
11. Sugimoto, K. and Sawada, Y. Corrosion Science. 17 (1977) , 425-445.
12. Clayton, C. R. and Lu, Y. C. Corrosion Science. 29 (1989) , 881-898.
13. Peguet, L. Malki, B. and Baroux, B. DEA report, INPG, (2003).
14. Gutman, E.M. Mechanonchemistry of solid surfaces. Singapore, 1994.
15. Dieter. E. George. Mechanical Metallurgy. Singapore , c1988.
16. Barbucci, A. et al., Journal of Alloys and Compounds. (2001) , 607-611.
17. Laycock, N. J. Stewart, J. Newman, R. C. Corrosion Science. 39 (1997) , 1791-1809.
18. Souier, T. PHD thesis, INP Grenoble. (2001).
19. Azuma, S. Kudo, T. Corrosion Science. 46 (2004) , 2265–2280.
20. Dawson, J. L. and Ferreira, M. G. S. Corrosion Science. 26 (1986) , 1027-1040.
21. Nash, B.K.and Kelly, R.G. Corrosion Science. 35 (1993) , 817-825.
22. Kamachi, U. and Shankar, P. Corrosion Science. 44 (2002) , 2183–2198.
23. Berthome, G. Baroux, B. Proceedings Electrochemical Society. (2001) , 259-264.
24. Baroux, B. Stainless steels. Chapter 14, c1993.
25. Pack, J.O. Suter, T. and Böhni, H. The journal of science and engineering. 59 (2003).

26. Marcus, P. and Olefjord, J. Corrosion mechanisms in theory and practice. 252, c1995.
27. Audouard, J.P. Stainless steels. 262, c1993.
28. Olefjord, I. Brox, B. and U.Jelvestam. J.Electrochem.Sec. 132 (1985) , 2854.
29. Bozec, N. Le, et al. Corrosion Science. 43 (2001) , 765-786.
30. Permpoon, S, et al. Influence of industrial surface finishes on localized corrosion of SS.
31. Lebedev, A.A. Kosarchuk, V.V. International Journal of Plasticity. 16 (2000) , 749-767.
32. C.R. and K.G.Matin. Proceeings of the International Conference on high Nitrogen Steel.
edited by J.Foct and A. Hendry (The institute of Metals,London,1989), 256-260.
33. Dayal, R.K. Corrosion of austenitic stainless steels. c2002.
34. International stainless steels forum (ISSF), New 200 series steels. November, 2005.
35. Okamoto, G. Corrosion Science. 13 (1973).
36. Denny, A,Jones. Principles and prevention of corrosion. Second edition, c1995.
37. Pierre-Jean Cunat. www.euroinox.org © Euro Inox. 2004.
38. García, E, et al. Oscillation and chaos in pitting corrosion of steel. 59 (2003).
39. Stephen, E. and Richard, C. Corrosion Science. 28 (1988) , 479-484.
40. Hultquist, G. and Leygraf, C. Corrosion Science. 21 (1981) , 401-408.
41. Wilde, B. E. and Williams, E. Electrochimica Acta. 16 (1971), 1971-1985.
42. Kim, Y. P. and Fregonese, M. NDT & E International. December (2003), 553-562.
43. Babi, R. and Metiko, M. Journal of Applied Electrochemistry. 23 (1993), p 352-357.
44. Friedel, J. Dislocations. c1964.
45. Kittel. Introduction to solid state physics. c1987.
46. Jakobsen, P.T. and Maahn, E. Corrosion Science. 43(2004), 1693–1709.
47. Bozec, N. Le and Compère, C. Corrosion Science. 43 (2001) , 765-786.
48. Zeng, Y.M. Lou, J.L. and Norton, P.R. Electrochimica Acta. 49 (2004) , 703–714.
49. Cottis, R.A, et al. Electrochimica Acta. 46 (2001), 3665–3674.
50. Olefjord, I. and Wegrelius, L. Corrosion Science. 38 (1996), 1203-1220.
51. Oltra, R.and Keddarn M. Stainless steels. Chapter 7, c1993.
52. Nestor Perez . Electrochemistry and Corrosion Science. Boston, c2004.

53. Fontana, M.G.and Green, N.D. Corrosion Engineering. McGraw-Hill, New York, c1978.
54. Evans U.R. The Corrosion and Oxidation of Metals. Ed. Edward Arnold (London), c1960.

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อน, และความลึกของการกัดกร่อนที่เกิดจาก
ผลกระทบปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิม

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อน, และความลึกของการกัดกร่อนที่เกิดจากผลกระทบปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิม

No. experiment	Sample	I measured (μA)	1+Swe/Sc	I crevice (μA)	corroded (mm^2)	j anodic ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Perimeter (mm)	Q anodic (C)	Weight (g)	Volume (mm^3)	Depth (μm)	Real area (mm^2)	j real (mA/cm^2)
1	A1	26.00	1.68	43.67	6.84	638.32	21.50	5.61	0.00164	0.21	30.44	7.50	8.52
2	A1	39.00	1.68	65.50	3.35	1957.60	26.79	3.66	0.00107	0.14	40.60	4.43	44.16
1	B1	32.00	1.68	53.74	4.37	1229.85	13.25	4.44	0.00130	0.16	37.74	4.87	25.25
2	B1	23.40	1.68	39.30	3.34	1176.67	16.15	4.41	0.00129	0.16	49.04	4.13	28.48
1	A2	15.70	1.68	26.37	8.56	308.04	19.18	1.51	0.00044	0.06	6.55	8.69	3.55
2	A2	9.55	1.68	16.04	8.88	180.62	18.82	3.21	0.00094	0.12	13.43	9.13	1.98
1	B2	20.80	1.68	34.93	7.54	463.32	10.38	2.75	0.00080	0.10	13.53	7.68	6.03
2	B2	9.05	1.68	15.20	3.93	386.76	15.74	1.66	0.00048	0.06	15.67	4.18	9.26

*j real คือ กระแสการกัดกร่อนต่อพื้นที่ได้จากการประมาณพื้นที่ในทาง 3 มิติ หรือ Real area

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อนที่เกิดจาก
ผลของกระแทกปริมาณโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิม

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อนที่เกิดจากผลกระทบปริมาณโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิม

No. experiment	Sample	Potential (mV)	I measured (μ A)	1+Swe/Sce	I crevice (μ A)	corroded area (mm ²)	j anodic (μ A/cm ²)
1	AISI 430, 50°C	-408	75	1.68	125.96	6.12	2058.23
2	AISI 430, 50°C	-428	80	1.68	134.36	4.03	3334.03
1	AISI 430, 60°C	-432	166	1.68	278.80	18.44	1511.93
2	AISI 430, 60°C	-415	111	1.68	186.43	5.00	3728.53
1	AISI 444, 50°C	-376	58	1.68	97.41	5.57	1748.87
2	AISI 444, 50°C	-360	26	1.68	43.67	6.75	646.93

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อน, และความลึกของการกัดกร่อนที่เกิดจาก
ผลกระทบการรีดเย็นในเหล็กกล้าไร้สนิม Low Ni

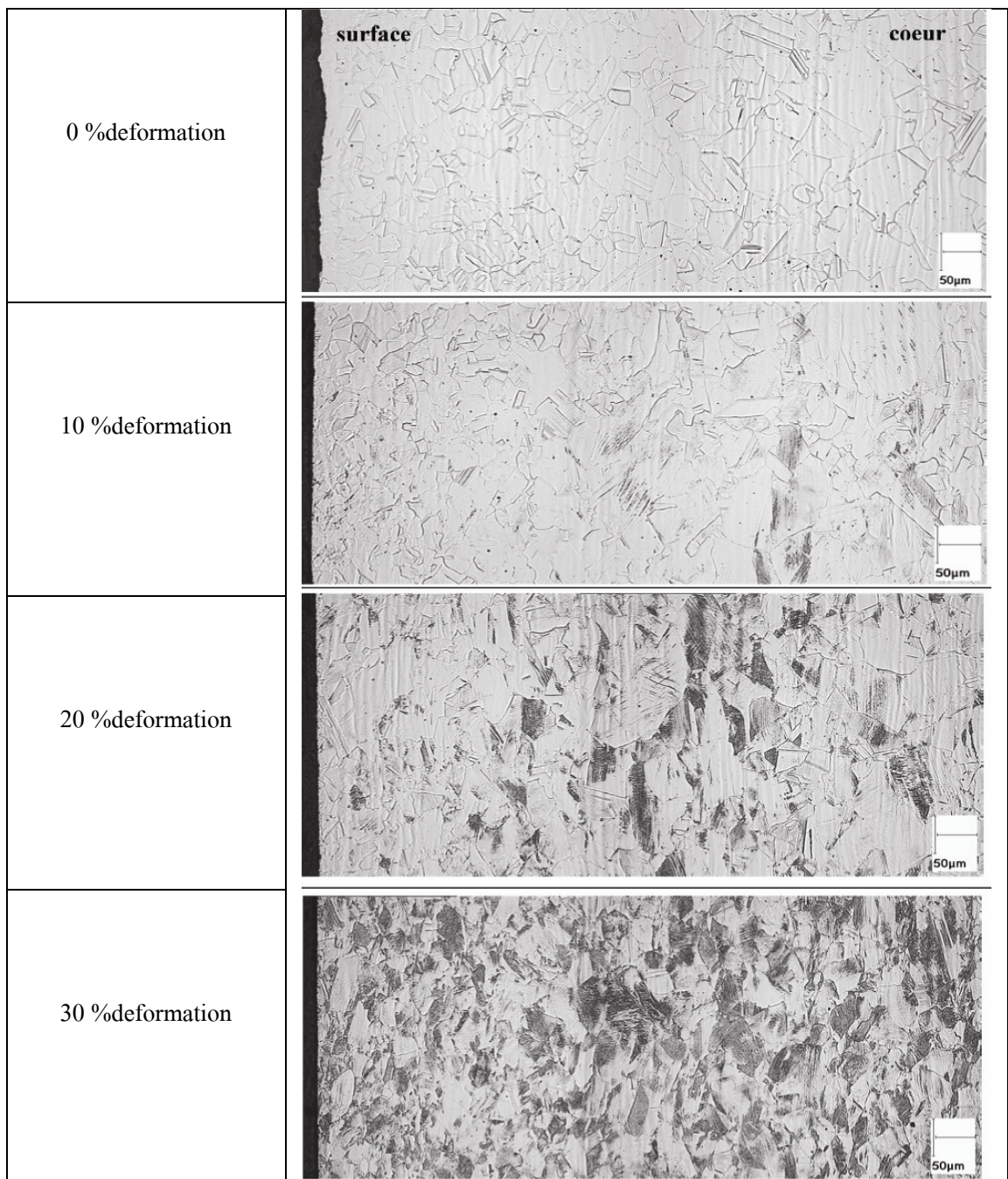
ตารางที่ ค-1 ผลการทดลอง, การคำนวณต่ออัตราการกัดกร่อน, และความลึกของการกัดกร่อนที่เกิดจากผลกระทบการรีดเย็นในเหล็กกล้าไร้สนิม Low Ni

No. experiment	Deformation (%)	I measured (μA)	I+Swe/Sce	I crevice (μA)	Corroded (mm^2)	j anodic ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Perimeter (mm)	Q anodic (C)	Weight (g)	volume (mm^3)	depth (μm)	Real area (mm^2)	j real (mA/cm^2)
1	0	28	1.68	47.03	5.62	836.77	26.63	4.12	0.00120	0.153	27.18	6.34	0.74
2	0	25	1.68	41.99	5.60	749.78	26.00	3.51	0.00103	0.130	23.26	6.20	0.68
1	10	18	1.68	30.23	5.26	574.74	25.30	3.42	0.00100	0.127	24.13	5.87	0.51
2	10	12	1.68	20.15	5.41	372.54	24.77	3.07	0.00090	0.114	21.05	5.93	0.34
3	10	21	1.68	35.27	3.43	1028.28	18.24	3.98	0.00116	0.148	43.03	4.21	0.84
1	20	22	1.68	36.95	2.16	1710.62	14.79	3.51	0.00102	0.130	60.26	3.05	1.21
2	20	21	1.68	35.27	3.29	1072.03	15.45	3.56	0.00104	0.132	40.21	3.91	0.90
1	30	28	1.68	47.03	1.25	3762.12	6.04	4.17	0.00122	0.155	123.77	2.00	2.35
2	30	26	1.68	43.67	1.33	3283.27	13.65	3.83	0.00112	0.142	106.75	2.79	1.57
1	70	34	1.68	57.10	5.06	1128.53	28.32	5.82	0.00170	0.216	42.69	6.27	0.91
2	70	24.4	1.68	40.98	1.80	2276.68	11.29	3.97	0.00116	0.147	81.89	2.72	1.50

*j real คือ กระแสการกัดกร่อนต่อพื้นที่ได้จากการประมาณพื้นที่ในทาง 3 มิติ หรือ Real area

ภาคผนวก ง

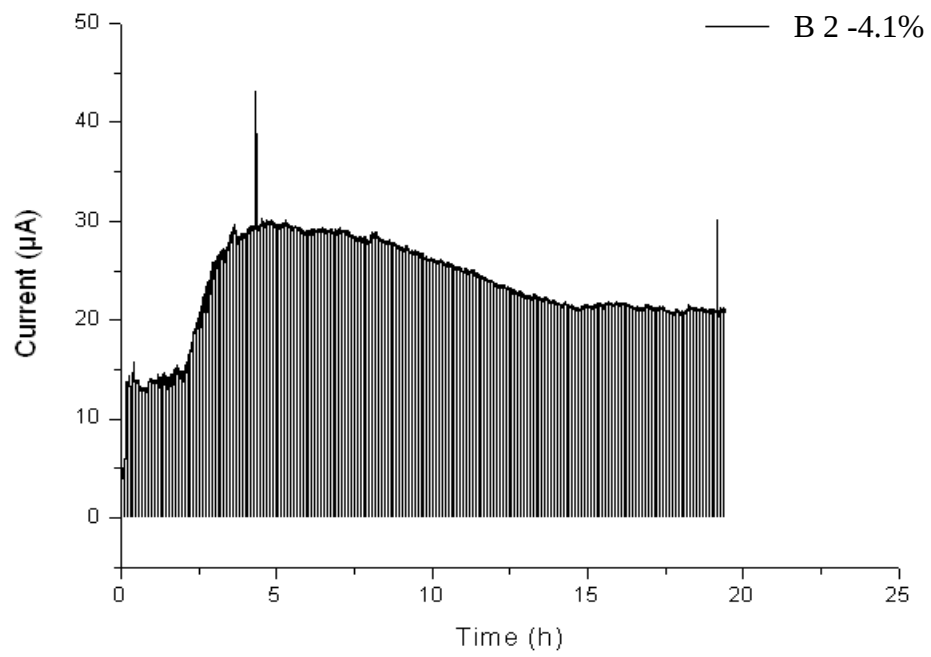
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม Low Ni เนื่องจากการรีดเย็นนำไปสู่
การเพิ่มขึ้นของมาร์เทนไซต์ จาก ศูนย์วิจัยของ Ugene [13]



ภาพที่ ง-1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมLow Ni เนื่องจากการรีดเย็นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของมาร์เทนไซต์ จากบริษัท ศูนย์วิจัยของ Ugine [13]

ภาคผนวก จ

การคำนวณประจุ (charge) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Origin 6.1



ภาพที่ จ-1 การคำนวณประจุ (charge) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Origin6.1

$$Q_{\text{measured}} = \int I(t)dt$$

$$Q_{\text{anodic}} = \left(1 + \frac{S_{\text{WE}}}{S_{\text{CE}}} \right) Q_{\text{measured}}$$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายคชาวุธ คุ่มภัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาผลกระทบของธาตุเจือและการแปรรูปเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม
ออสติเนติก และกลุ่มเฟอร์ริติกในสภาวะการกัดกร่อนภายใต้รอยเชื่อม

สาขาวิชา : วิศวกรรมเคมี

ประวัติ

เกิดเมื่อ วันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524

สถานที่เกิด จังหวัดนครศรีธรรมราช

การศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช

การศึกษา ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การฝึกอบรม ตุลาคม 2548 – เมษายน 2549 การศึกษาการกัดกร่อนภายใต้รอยเชื่อมของ
เหล็กกล้าไร้สนิม ณ Institute National Polytechnique de Grenoble (INPG) ประเทศฝรั่งเศส

ได้รับรางวัลชมเชย สาขา วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี “โครงการรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 (2547)” ชื่อผลงาน แผ่นระบายความร้อนสำหรับ notebook

ได้รับรางวัลรองชนะเลิศ สาขา นวัตกรรมเชิงธุรกิจ “โครงการรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 (2547)” ชื่อผลงาน แผ่นระบายความร้อนสำหรับ notebook

ได้รับรางวัลชมเชย จากโครงการยอดนักคิดกับมิชลิน ประจำปี 2546 แนวคิด “เพื่ออนุรักษ์พลังงาน และสิ่งแวดล้อม” ชื่อผลงาน แผ่นระบายความร้อนสำหรับ notebook

เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเมื่อ พ.ศ. 2548